



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ОСНОВИ МЕХАНІЧНИХ РОЗРАХУНКІВ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ

РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНА РОБОТА

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для студентів,
які навчаються за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка», освітньою програмою «Електричні системи і мережі»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2019

Основи механічних розрахунків повітряних ліній електропередавання : Розрахунково-графічна робота [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. Спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньої програми «Електричні системи і мережі» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Т. Л. Кацадзе. – Електронні текстові дані (1 файл: 5,51 МБ). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 60 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 3 від 28.11.2019 р.)
за поданням Вченої ради Факультету електроенерготехніки та автоматики
(протокол № 4 від 25.11.2019 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

ОСНОВИ МЕХАНІЧНИХ РОЗРАХУНКІВ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ

РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНА РОБОТА

Укладач: *Кацадзе Теймураз Луарсабович*, канд. техн. наук, доц.

Відповідальний
редактор *Баженов В. А.*, канд. техн. наук, доц.

Рецензент *Дмитренко О. О.*, канд. техн. наук, доц., доцент кафедри автоматизації енергосистем КПІ ім. Ігоря Сікорського

Навчальний посібник містить теоретичний матеріал, необхідний для виконання розрахунково-графічної роботи «Механічний розрахунок проводів повітряної лінії електропередавання» з дисципліни «Основи механічних розрахунків повітряних ліній електропередавання» студентами усіх форм навчання та студентами-іноземцями спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» освітньої програми «Електричні системи і мережі». Також, матеріал навчального посібника може виявитися корисним під час виконання розрахунків механічної частини повітряних ліній в процесі курсового та дипломного проектування студентами спеціальності.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1. СТИСЛІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ДО ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ «МЕХАНІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ПРОВODІВ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ»	6
1.1. Принципи механічних розрахунків повітряних ліній	6
1.2. Механічні навантаження на проводи та троси повітряних ліній.....	12
1.3. Вихідний кліматичний режим.....	18
1.4. Систематичний розрахунок проводів повітряної лінії.....	24
1.5. Критична температура	27
1.6. Розрахунок аварійного режиму повітряної лінії електропередавання	29
2. ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ МЕХАНІЧНОГО РОЗРАХУНКУ ПРОВODІВ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ	32
2.1. Розрахунок середньої висоти розташування центру мас проводів та зведеного прогону анкерованої ділянки.....	33
2.2. Розрахунок одиничних та питомих навантажень на проводи повітряної лінії	35
2.3. Визначення вихідного кліматичного режиму.....	39
2.4. Систематичний розрахунок проводів.....	40
2.5. Визначення режиму найбільшої стріли провисання проводу.....	43
2.6. Розрахунок аварійного режиму повітряної лінії.....	44
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	46
ДОДАТКИ.....	47
Додаток А. Бланк завдання на виконання контрольної роботи «Механічний розрахунок проводів повітряної лінії електропередавання»	47
Додаток Б. Довідникові матеріали	48
Додаток В. Кліматичне районування території України.....	55

ВСТУП

Навчальний посібник містить теоретичний матеріал, необхідний для виконання розрахунково-графічної роботи «Механічний розрахунок проводів повітряної лінії електропередавання» з дисципліни «Основи механічних розрахунків повітряних ліній електропередавання» студентами усіх форм навчання та студентами-іноземцями спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» освітньої програми «Електричні системи і мережі». Також, матеріал даного навчального посібника може виявитися корисним під час виконання розрахунків механічної частини повітряних ліній в процесі курсового та дипломного проектування студентами спеціальності.

Виконання розрахунково-графічної роботи сприяє опановуванню студентами лекційного матеріалу дисципліни «Основи механічних розрахунків повітряних ліній електропередавання» та набуття ними практичних навичок з виконання інженерних розрахунків механічної частини повітряних ліній.

Кожний студент отримує у викладача варіант індивідуального завдання, у якому наведені такі вихідні дані:

- номінальна напруга повітряної лінії;
- марка проводу;
- тип проміжної опри;
- тип та характеристики ізоляторів підтримуючих підвісів;
- район траси повітряної лінії;
- дані про прогони анкерованої ділянки;
- порядковий номер прогону, в якому відбувається обрив проводу в аварійному режимі.

Розрахунково-графічна робота складається з одного комплексного завдання, яке містить 6 наступних задач.

1. Визначення середньої висоти розташування центру мас проводів лінії та довжини зведеного прогону анкерованої ділянки.
2. Розрахунок одиничних та питомих навантажень на проводи повітряної лінії.
3. Визначення вихідного кліматичного режиму.
4. Розрахунок механічного напруження та стріли провисання проводів в розрахункових кліматичних режимах для всіх прогонів анкерованої ділянки.
5. Визначення кліматичного режиму найбільшої стріли провисання проводу.
6. Розрахунок стріли провисання проводу в аварійному режимі повітряної лінії.

Теоретичні викладки, наведені в навчальному посібнику, доповнені розв'язанням задач типового комплексного завдання, які призначені для

полегшення сприйняття матеріалу та вирішення практичних завдань під час виконання виконанні розрахунково-графічної роботи (див. розділ 2).

Розрахунки при виконанні розрахунково-графічної роботи можна виконувати з використанням звичайних обчислювальних засобів, наприклад, калькуляторів, або за допомогою ПЕОМ та відповідного програмного забезпечення.

Результати виконання розрахунково-графічної роботи студент оформлює у вигляді пояснювальної записки. Пояснювальна записка повинна в короткій і чіткій формі містити зміст роботи, опис методів аналізу та розрахунку, власне розрахунки, аналіз результатів цих розрахунків та обґрунтовані висновки. Пояснювальна записка має бути написана грамотно, чіткою інженерно-технічною мовою. Розрахунки та дані до них повинні супроводжуватися короткими поясненнями і посиланнями на літературу. При виконанні розрахунків формули слід навести спочатку в буквеному виразі, а потім – у цифровому, результати обчислень обов'язково вказувати з розмірністю отриманих величин. Розрахунки, які багаторазово повторюються, наводити один раз, а всі результати зводити до таблиці. Текст пояснювальної записки обов'язково доповнюють ілюстраціями (діаграмами, схемами, графіками).

1. СТИСЛІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ДО ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ «МЕХАНІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ПРОВІДІВ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ»

1.1. ПРИНЦИПИ МЕХАНІЧНИХ РОЗРАХУНКІВ КОНСТРУКЦІЙ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ

Під час виконання механічних розрахунків повітряних ліній враховують постійні, змінні та аварійні навантаження та впливи.

До постійних навантажень відносять навантаження, обумовлені власною вагою будівельних конструкцій, проводів, тросів та устаткування повітряних ліній; натягом проводів та тросів за середньорічної температури і відсутності вітру та ожеледі; вагою та тиском ґрунтів, тиском води на фундаменти в руслах рік, а також попереднім напруженням конструкцій.

До змінних відносять навантаження, обумовлені натиском вітру на проводи, троси та конструктивні елементи опор, вагою відкладень ожеледі та проводах і тросах; додатковим натягом проводів понад їх значення за середньорічної температури; тиском води на опори та фундаменти в заплавах рік; тиском льоду; навантаження, які виникають під час виготовлення, перевезення та монтажу конструкцій, проводів та тросів.

За тривалістю змінні навантаження поділяють на тривалі, короткочасні та епізодичні. До короткочасних навантажень відносять, наприклад, навантаження за екстремальних кліматичних умов (максимальний натиск вітру, максимальна ожеледь, мінімальна температура). До епізодичних відносять сейсмічні навантаження. Решту навантажень розглядають як тривалі.

До аварійних відносять навантаження, обумовлені обривом проводів та тросів лінії.

Часто, як окремий вид навантажень, розглядають кліматичні навантаження, обумовлені зміною кліматичних умов в районі траси лінії. Очевидно, кліматичні навантаження характеризуються випадковими величинами, прояв яких має ймовірнісний характер і можуть відбуватися у будь-який час протягом розрахункового періоду експлуатації лінії. Природно, що в розрахунках механічних навантажень необхідно враховувати найбільш екстремальні умови, які можуть спостерігатися в районі проходження траси лінії.

Відповідно до чинних нормативів механічних розрахунків повітряних ліній електропередавання визначають граничні та експлуатаційні кліматичні навантаження.

Граничне розрахункове навантаження відповідає екстремальній ситуації, що може виникнути в середньому не більше одного разу протягом

періоду експлуатації повітряної лінії. Перевищення граничного розрахункового навантаження обумовлює повну втрату працездатності конструкцій.

Експлуатаційне розрахункове навантаження – кліматичне навантаження, що характеризує умови нормальної експлуатації конструкції повітряної лінії. Перевищення експлуатаційного розрахункового навантаження обумовлює часткову втрату працездатності конструкцій, наприклад, виникнення неприпустимих габаритів струмопровідних проводів, неприпустимих переміщень конструкцій, розкриття тріщин тощо.

Критерієм вибору кліматичних навантажень та впливів на конструктивні елементи повітряних ліній є певна ймовірність неперевищення навантажень протягом всього періоду експлуатації ліній своїх граничних значень. Таке неперевищення граничних навантажень розглядають як безвідмовність конструкції лінії. Чинні нормативні документи встановлюють чотири класи безвідмовності повітряних ліній відповідно до рівня відповідальності ліній в енергосистемі. Класи безвідмовності визначають такі характеристики повітряних ліній електропередавання:

- номінальну напругу;
- розрахунковий період експлуатації лінії;
- безвідмовність повітряної лінії протягом періоду експлуатації;
- середні періоди повторюваності граничних та експлуатаційних кліматичних навантажень та впливів.

Характеристики класів безвідмовності повітряних ліній наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1. Характеристики класів безвідмовності повітряних ліній

Клас безвідмовності	Номінальна напруга, кВ	Розрах. період експлуатації, років	Ймовірність безвідмовної роботи		Середній період повторюваності, років	
			Протягом 1 року	Протягом періоду експлуатації	Граничних навантажень	Експл. навантажень
1 КБ	До 1	30	0,967	0,36	30	5
2 КБ	1–35	50	0,980	0,36	50	10
3 КБ	110–330	50	0,993	0,72	150	15
4 КБ	500–750	50	0,998	0,90	500	25

Кліматичні умови для розрахунків конструктивних елементів повітряних ліній визначають за їх характеристичними значеннями, що відповідають середнім значенням кліматичних навантажень та впливів за середнього періоду повторюваності 50 років.

Таку інформацію містять, наприклад, мапи кліматичного районування території України, представлені в Додатку В. Так, за максимальною температурою територію України поділяють на три райони з характеристичними значеннями $+36^{\circ}\text{C}$, $+38^{\circ}\text{C}$ та $+40^{\circ}\text{C}$ відповідно (див. рис. Д1). За мінімальною температурою виділяють дев'ять районів з характеристичними значеннями температури в межах $-24^{\circ}\text{C} \dots -40^{\circ}\text{C}$ із кроком 2°C (див. рис. Д2). За середньорічною температурою, своєю чергою, виділяють сім районів з характеристичними значеннями температури в межах $+6^{\circ}\text{C} \dots +12^{\circ}\text{C}$ із кроком 2°C (див. рис. Д3). На рис. Д4 наведено мапу кліматичного районування території України за характеристичними значеннями навантажень від ваги відкладень ожеледі на проводах повітряних ліній. Така мапа визначає поділ території України на шість районів з характеристичними значеннями навантажень 8, 12, 15, 20, 30 та 40 Н/м відповідно. За вітровим навантаженням, територію України поділяють на п'ять районів з характеристичними значеннями в межах $400 \dots 600 \text{ Па}$ із кроком 50 Па (див. рис. Д5). За вітровим навантаженням під час ожеледі виділяють шість районів з характеристичними значеннями вітрового натиску в межах $150 \dots 400 \text{ Па}$ з кроком 50 Па (див. рис. Д6).

Кліматичні навантаження за будь-якого розрахункового періоду повторюваності визначають шляхом множення характеристичних значень на відповідні коефіцієнти надійності. В табл. 1.2, наприклад, наведено значення коефіцієнтів надійності для розрахунку проводів та тросів повітряних ліній за розрахункових періодів повторюваності відповідних класів безвідмовності.

Таблиця 1.2. Коефіцієнти надійності кліматичних навантажень за розрахункових періодів повторюваності

Вид навантаження	Клас безвідмовності лінії			
	1 КБ	2 КБ	3 КБ	4 КБ
Від ваги ожеледі	0,4	0,6	0,7	0,85
Від максимального вітрового натиску	0,6	0,7	0,8	0,87
Від дії вітру на провід, вкритий ожеледдю	0,47	0,63	0,72	0,84

Однією з основних вимог до конструктивного виконання повітряних ліній є забезпечення механічної міцності конструкцій, що визначає необхідність здійснення механічних розрахунків. В задачах розрахунку проводів та тросів повітряних ліній на механічну міцність застосовують метод допустимих напружень, який гарантує роботоздатність конструкції повітряної лінії за будь-яких можливих кліматичних навантажень та впливів протягом періоду експлуатації. Суть методу полягає в тому, що механічна міцність проводів та тросів забезпечується нормативним значенням допустимого напруження, обумовленим з певним запасом межею міцності за

розтягування (тимчасовим опором руйнуванню) проводу (тросу). Таким чином, необхідно забезпечити таку конструкцію лінії, щоб за будь-яких можливих кліматичних умов в районі траси лінії напруження у матеріалі проводу не перевищило свого допустимого значення відповідно до виразу

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_{\text{доп}} = \frac{\sigma_{\text{в}}}{k},$$

де σ_{\max} – найбільше напруження, яке може виникати в нижній точці провисання проводу під час експлуатації лінії; $\sigma_{\text{доп}}$ – нормативне допустиме напруження проводу (тросу); $\sigma_{\text{в}}$ – межа міцності проводу (тросу) під час розтягування (тимчасовий опір руйнуванню); k – коефіцієнт запасу міцності.

Для визначення запасу міцності проводів та тросів слід зважати на такі обставини:

- 1) характеристичні значення кліматичних навантажень та впливів визначають з певною достовірністю на підставі статистичної обробки даних багаторічних спостережень на метеорологічних станціях в районі траси повітряної лінії;
- 2) в багатопроволочних проводах та тросах виникають додаткові напруження, обумовлені пружними деформаціями під час скручування проволок, крім того слід враховувати нерівномірний розподіл тяжіння між окремими повивами проволок;
- 3) механічний розрахунок проводів та тросів виконують за найменшим тяжінням в нижній точці провисання, також слід враховувати напруження вигину проводів та тросів в місцях їх закріплення.

Напруження, які виникають в проводі за екстремальних умов, наприклад, в режимах мінімальних температур або максимального вітру не мають перевищувати певного гранично допустимого значення. Це означає, що в будь-якому іншому можливому режимі експлуатації лінії механічні напруження гарантовано не перевищать своїх гранично допустимих значень.

Слід зазначити, що чинні нормативи визначають допустимі напруження для режимів мінімальних температур, максимальних навантажень та для експлуатаційного режиму. Для режимів мінімальних температур та максимальних навантажень встановлено однакові допустимі механічні напруження. Допустимі напруження в експлуатаційному режимі, природно, менша за гранично допустимі напруження в екстремальних режимах. Це пояснюється тим, що екстремальні кліматичні режими (мінімальних температур та максимальних навантажень) є короткочасними на відміну від довготривалого експлуатаційного режиму. Очевидно, що коефіцієнт запасу міцності для експлуатаційного режиму має бути більшим, чим для екстремальних короткочасних режимів, а отже, гранично допустиме напруження в експлуатаційному режимі менше, чим в режимах мінімальних температур

та максимальних навантажень. Таким чином, для алюмінієвих проводів встановлено 55-65% запас міцності (коефіцієнт запасу міцності в межах 2,22–2,85) в режимах мінімальних температур та максимальних навантажень відповідно до площі поперечного перерізу проводу. Для сталевих проводів запас міцності в даних режимах встановлено в межах 50-60% (коефіцієнт запасу міцності в межах 2,0–2,5) відповідно до площі поперечного перерізу проводу та співвідношення між перерізами сталевих та алюмінієвих проволок. В експлуатаційному режимі для всіх типів сталевих та алюмінієвих проводів встановлено 70%-й запас міцності (коефіцієнт запасу міцності 3,33).

Відомо, що кліматичні навантаження на проводи та троси повітряної лінії визначаються висотою їх розташування над поверхнею землі. Так, збільшення висоти розташування проводів призводить до збільшення навантажень, обумовлених відкладеннями ожеледі та вітровим натиском. Це означає, що для виконання механічних розрахунків конструкцій повітряних ліній необхідно обов'язково враховувати фактичне положення проводів та тросів у просторі. Кліматичні навантаження на проводи та троси розраховують для висоти розташування над землею центрів мас відповідних елементів лінії.

Висоту розташування центру мас проводу визначають за виразом (див. рис. 1.1)

$$h_c = h_0 - \frac{2}{3} f, \quad (1.1)$$

де h_0 – висота закріплення проводу на опорі над землею; f – стріла провисання проводу.

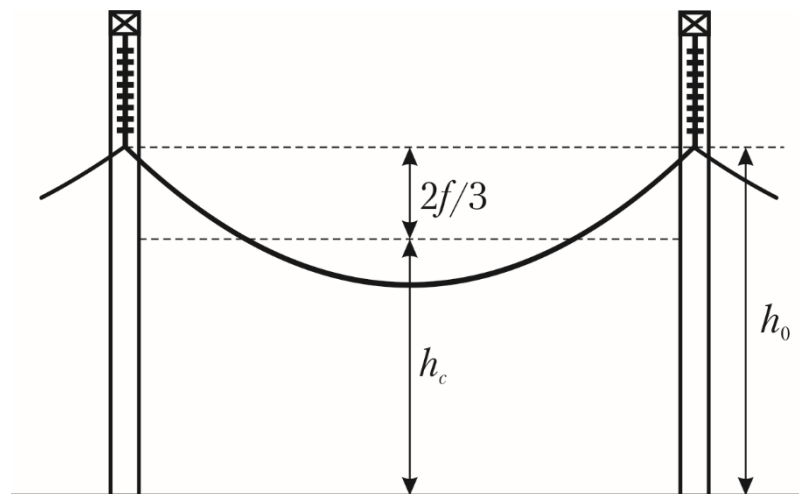


Рис. 1.1. Визначення висоти розташування центру мас проводу

Навантаження від відкладень ожеледі та вітрового натиску на проводи повітряної лінії обчислюють за висотою розташування зведеного центру мас всіх проводів, закріплених у прогоні, відповідно до виразу

$$h_{зв} = h_{сер} - \frac{2}{3} f_{max}, \quad (1.2)$$

де $h_{сер}$ – середня висота кріплення проводів до ізоляційних підвісів, яку відраховують від рівня землі в місцях встановлення опор; f_{max} – габаритна стріла провисання проводу – максимально допустима стріла провисання за умови забезпечення нормованої габаритної відстані між проводами лінії та землею або інженерною спорудою.

Габаритну стрілу провисання проводу можна визначити за виразом

$$f_{max} = h_0 - G, \quad (1.3)$$

де $h_0 = h_t - \lambda$ – висота закріплення проводу на нижній траверсі; h_t – висота нижньої траверси над землею; λ – довжина ізоляційного підвісу; G – нормована габаритна відстань під проводами до землі або інженерної споруди.

Зазначимо, що через неоднорідність рельєфу вздовж траси лінії, перетинання лінії з інженерними спорудами прогони анкерованої ділянки не однакові, як показано на рис. 1.2. Якщо б проводи на проміжних опорах були жорстко закріплені, то тяжіння в прогонах не були б однаковими. Очевидно, чим більша довжина прогону та більша вага проводу у прогоні, тим більшого тяжіння зазнає провід. Внаслідок виникнення різниці тяжінь на суміжних прогонах ізоляційні підвіси на проміжних опорах відхиляються від вертикального стану. В результаті короткі прогони збільшуються, великі – скорочуються, а на всій анкерованій ділянці встановлюється однакове тяжіння.

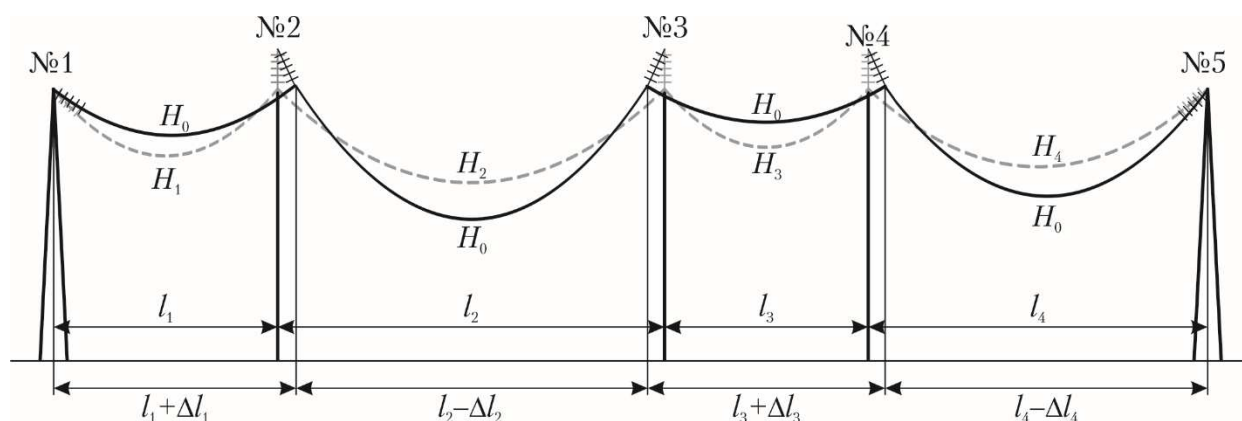


Рис. 1.2. Відхилення підтримуючих ізоляційних підвісів на анкерованій ділянці

Встановленому на анкерованій ділянці тяжінню відповідає фіктивний зведений прогін – еквівалентний за умовою однаковості тяжінь у прогонах, довжину якого визначають за виразом

$$l_{\text{зв}} = \sqrt{\sum l_i^3 / \sum l_i}. \quad (1.4)$$

1.2. МЕХАНІЧНІ НАВАНТАЖЕННЯ НА ПРОВОДИ ТА ТРОСИ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ

Під час виконання механічних розрахунків повітряних ліній вважають, що навантаження на проводи та троси рівномірно розподілені вздовж довжини проводу (тросу) та є статичними. При цьому визначають наступні сім типів механічних навантажень на проводи та троси повітряних ліній.

1. Навантаження від власної ваги проводу (тросу).

Навантаження від власної ваги обумовлене матеріалом та конструкцією проводу (тросу). Таке навантаження є постійним та вертикальним. Одиничне навантаження від власної ваги проводу (тросу) (див. рис. 1.3) визначають за чинними стандартами або відповідними технічними умовами на кабельно-провідникову продукцію

$$p_1 = g \cdot M_0 \cdot 10^{-3}, \quad (1.5)$$

де g – прискорення вільного падіння; M_0 – маса 1 км проводу, кг.

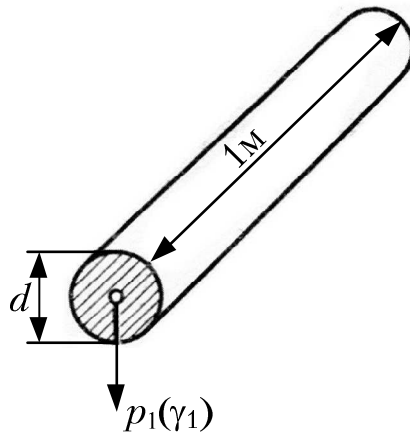


Рис. 1.3. Навантаження від власної ваги проводу

Відповідне значення питомого навантаження визначають за виразом

$$\gamma_1 = \frac{g \cdot G_0 \cdot 10^{-3}}{F}. \quad (1.6)$$

2. Навантаження від ваги відкладень ожеледі.

Навантаження від ваги відкладень ожеледі на проводах та тросах повітряної лінії є змінним кліматичним вертикальним навантаженням.

Відкладення ожеледі на проводах і тросах повітряних ліній являють собою неоднорідну структуру неправильної форми, яка визначається налипанням мокрого снігу, памороззю та відкладенням льоду. Однак, у розрахунках механічних навантажень на конструктивні елементи повітряних ліній умовно вважають, що відкладення ожеледі на проводах і тросах має форму ідеального полого циліндру однорідної структури із густиною 900 кг/м^3 , як показано на рис. 1.4, де d – внутрішній діаметр полого циліндру (діаметр проводу або тросу); b – товщина стінки циліндру (товщина стінки ожеледі).

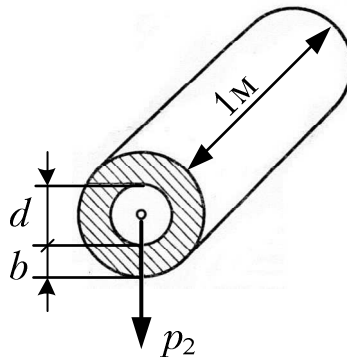


Рис. 1.4. Навантаження від ваги ожеледі

Одиничне навантаження від ваги відкладень ожеледі визначають за виразом

$$p_2 = 0,9g\gamma_{fm}\pi k_h\mu b(d + k_h\mu b)10^{-3}, \quad (1.7)$$

де $\rho = 0,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – густина ожеледі; γ_{fm} – коефіцієнт надійності за вагою ожеледі відповідно до середнього періоду повторюваності (див. табл. 1.2); k_h, μ – поправкові коефіцієнти, які враховують зміну товщини стінки ожеледі відповідно до висоти розташування зведеного центру ваги проводів у прогону та діаметру проводу або тросу відповідно (див. табл. 1.3).

Для визначення механічного навантаження від ваги ожеледі за виразом (1.7) необхідно використовувати дані мап територіального районування України за характеристичними значеннями ожеледних навантажень, або за даними спостережень на метеорологічних станціях в районі траси повітряної лінії.

Таблиця 1.3. Поправкові коефіцієнти навантаження від ожеледі

Висота роз- ташування проводу, м	Поправковий коефіцієнт за висотою	Діаметр проводу або троса, мм	Поправковий коефіцієнт за діаметром проводу
5	0,8	до 5	1,1
10	1,0	5	1,1
20	1,2	10	1,0
30	1,4	20	0,9
50	1,6	30	0,8
70	1,8	50	0,7
100	2,0	70	0,6

3. *Сумарне навантаження від ваги проводу (тросу), вкритого ожеледдю.*

Навантаження від власної ваги проводу (тросу) та ваги відкладень ожеледі діють в одному вертикальному напрямку, як показано на рис. 1.5. Тому сумарне навантаження визначається арифметичною сумою складових навантажень:

$$p_3 = p_1 + p_2; \quad \gamma_3 = \frac{p_3}{F}. \quad (1.8)$$

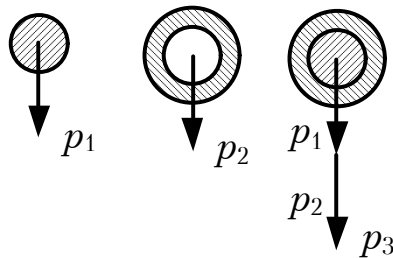


Рис. 1.5. Навантаження від ваги проводу (тросу) вкритого ожеледдю

4. *Навантаження від натиску вітру.*

Навантаження від натиску вітру на проводи та троси повітряної лінії є змінним кліматичним горизонтальним навантаженням, умовно представленим на рис. 1.6.

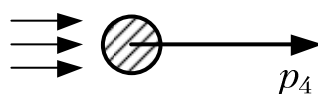


Рис. 1.6. Навантаження від натиску вітру

У загальному випадку навантаження від натиску вітру визначають за виразом

$$p_4 = \gamma_{f \max} C_x C_{dc} C_c q d \cdot 10^{-3}, \quad (1.9)$$

де $\gamma_{f \max}$ – коефіцієнт надійності за максимальним натиском вітру, який визначають відповідно до середнього періоду повторюваності кліматичних умов за даними табл. 1.2; C_x – коефіцієнт лобового опору (аеродинамічний коефіцієнт), який визначається густиною повітря, швидкістю вітру, формою, розмірами та шорсткістю поверхні і дорівнює 1,1 для проводів і тросів діаметром від 20 мм та 1,2 – для проводів і тросів діаметром до 20 мм, а також проводів і тросів будь-якого діаметру, вкритих ожеледдю; C_{dc} – коефіцієнт динамічності натиску вітру, який враховує нерівномірність натиску вітру вдовж прогону та пульсаційну складову дії вітру; C_c – коефіцієнт впливу на вітрове навантаження розташування проводів та тросів повітряної лінії; q – швидкісний натиск вітру (характеристичне значення вітрового навантаження); d – діаметр проводу, мм.

Коефіцієнт динамічності натиску вітру визначають за формулою

$$C_{dc} = q_{tu} \alpha k_l, \quad (1.10)$$

де q_{tu} – коефіцієнт впливу пульсаційного складника, який визначається типом місцевості за даними табл. 1.4; $\alpha = 2,6 - 0,3 \ln q$, але не більший за одиницю – коефіцієнт, який враховує нерівномірність натиску вітру вздовж прогону; k_l – коефіцієнт довжини прогону (див. дані табл. 1.5).

Таблиця 1.4. Коефіцієнт впливу пульсаційного складника

Тип місцевості	I	II	III	IV
Коефіцієнт впливу пульсаційного складника	1,3	1,5	1,6	1,7

Таблиця 1.5. Коефіцієнт довжини прогону

Довжина прогону, м	Коефіцієнт довжини прогону
до 50	1,2
від 50 до 800	$1,7 - 0,12 \ln l$
більше 800	0,85

Коефіцієнт впливу на вітрове навантаження розташування проводів та тросів повітряної лінії розраховують за виразом

$$C_c = C_h C_R C_{DIR}, \quad (1.11)$$

де $C_h = \beta(0,1h)^{2\alpha}$ – коефіцієнт висоти розташування проводу, який враховує збільшення вітрового натиску із збільшенням висоти над поверхнею землі; α, β – параметри відповідно до даних табл. 1.6; C_R – коефіцієнт рельєфу, який слід враховувати за умови проходження траси лінії в гірській місцевості, на пагорбі чи схилі; C_{DIR} – коефіцієнт напрямку вітру, який враховують у разі проходження траси лінії на відкритій рівнинній місцевості з постійним напрямом вітру за умови достатнього статистичного обґрунтування. Як правило, коефіцієнти рельєфу та напрямку вітру приймають такими, що дорівнюють одиниці.

Таблиця 1.6. Параметри коефіцієнту висоти розташування проводу

Тип місцевості	α	β
I	0,1	1,5
II	0,15	1,0
III	0,2	0,65
IV	0,25	0,4

Механічні навантаження від натиску вітру не несуть самостійного практичного змісту. Тому, для такого навантаження питоме значення не розраховують.

5. Навантаження від натиску вітру на проводи, вкриті ожеледдю.

Навантаження від натиску вітру на проводи та троси, вкриті ожеледдю є змінними кліматичними горизонтальними навантаженнями, як показано на рис. 1.7.

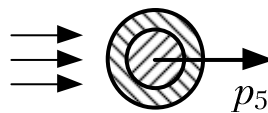


Рис. 1.7. Навантаження від тиску вітру на провід, покритий ожеледдю

Розрахунок вітрових навантажень в режимі ожеледі здійснюють аналогічно розглянутому вище розрахунку вітрових навантажень за відсутності ожеледі. Для таких розрахунків використовують вираз, аналогічний (1.9):

$$p_5 = 1,2\gamma_{fQ}C_{dc}C_cq'd \cdot 10^{-3}, \quad (1.12)$$

де γ_{fQ} – коефіцієнт надійності дії вітру на проводи та троси, вкриті ожеледдю відповідно до даних табл. 1.2; q' – швидкісний натиск вітру (харак-

теристичне значення натиску вітру) в режимі ожеледі. У виразі (1.12) враховано, що аеродинамічний коефіцієнт для проводів, покритих ожеледдю завжди дорівнює 1,2.

Механічні навантаження від натиску вітру на проводи та троси, покриті ожеледдю не несуть самостійного практичного змісту. Тому, для такого навантаження питоме значення не розраховують.

6. Сумарне навантаження від ваги проводу (тросу) та натиску вітру.

Для визначення результуючих (сумарних) навантажень на проводи необхідно знайти геометричну суму всіх діючих на нього вертикальних і горизонтальних навантажень (див. рис. 1.8).

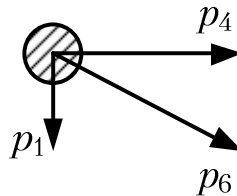


Рис. 1.8. Сумарне навантаження від власної ваги тиску вітру на провід

Сумарне одиничне навантаження на проводи (троси) від власної ваги та натиску вітру дорівнює

$$p_6 = \sqrt{p_1^2 + p_4^2}. \quad (1.13)$$

Відповідне питоме навантаження визначають за виразом

$$\gamma_6 = \frac{p_6}{F}.$$

7. Сумарне навантаження від ваги проводу (тросу), покритого ожеледдю, і натиску вітру.

Відповідно до чинних нормативів умовно вважають, що в режимі вітру під час ожеледі навантаження від ваги ожеледі складає 90% максимального. Таким чином, схема визначення сумарного навантаження від ваги проводу (тросу), вкритого ожеледдю та натиску вітру має вигляд, представлений на рис. 1.9.

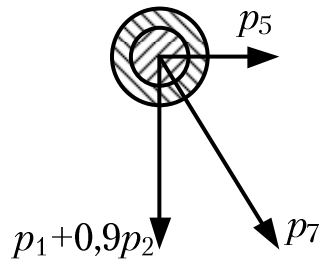


Рис. 1.9. Сумарне навантаження від ваги проводу, покритого ожеледдю та тиску вітру

Одиничне та питоме сумарне навантаження від ваги проводу, вкритого ожеледдю та натиску вітру визначають за виразами

$$p_7 = \sqrt{(p_1 + 0,9p_2)^2 + p_5^2};$$

$$\gamma_7 = \frac{p_7}{F}.$$
(1.14)

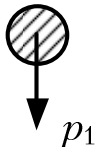
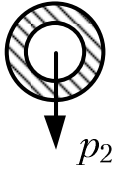
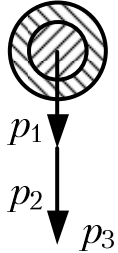
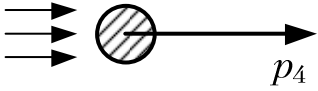

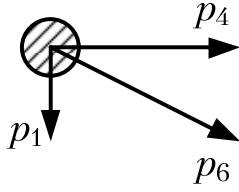
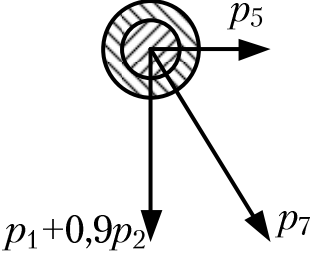
Розрахункові схеми та відповідні вирази до визначення одиничних навантажень на проводи та троси повітряних ліній електропередавання зведено до табл. 1.7.

1.3. ВИХІДНИЙ КЛІМАТИЧНИЙ РЕЖИМ

Відповідно до методу допустимих напружень необхідно забезпечити таку конструкцію повітряної лінії, щоб за будь-яких можливих кліматичних умов напруження проводів та тросів не перевищували своїх допустимих значень. Також слід запобігати невиннованих завищених капіталовкладень в конструкцію повітряної лінії, які забезпечують механічну міцність конструкції, більшу за необхідну. Таким чином, з метою забезпечення прийнятних техніко-економічних показників повітряної лінії, є доцільним конструктивне забезпечення допустимих механічних напружень проводів лінії в режимі, який характеризується найбільшими значеннями напруження проводу. Тоді в інших можливих режимах механічні напруження проводів гарантовано не перевищать своїх допустимих значень.

Отже, задача проектування механічної частини повітряної лінії зводиться до визначення кліматичного режиму, за якого спостерігаються найбільші напруження в проводах та тросах лінії. Відповідний кліматичний режим прийнято називати вихідним.

Таблиця 1.7. Розрахункові схеми до визначення
одиничних навантажень на проводи та троси повітряної лінії

№ з/п	Тип навантаження	Розрахункова схема
1	Навантаження від власної ваги проводу $p_1 = g \cdot G_0 \cdot 10^{-3}$	
2	Навантаження від ваги відкладень ожеледі $p_2 = 0,9g\gamma_{fn}\pi k\mu b(d + k\mu b)10^{-3}$	
3	Сумарне навантаження від ваги проводу, вкритого ожеледдю $p_3 = p_1 + p_2$	
4	Навантаження від натиску вітру $p_4 = \gamma_{f\max}C_{dc}C_xC_cqd \cdot 10^{-3}$	
5	Навантаження від натиску вітру на про- води, вкриті ожеледдю $p_5 = 1,2\gamma_{fQ}C_{dc}C_cq'd \cdot 10^{-3}$	
6	Сумарне навантаження від ваги проводу та натиску вітру $p_6 = \sqrt{p_1^2 + p_4^2}$	
7	Сумарне навантаження від ваги проводу, покритого ожеледдю, та натиску вітру $p_7 = \sqrt{(p_1 + 0,9p_2)^2 + p_5^2}$	

Оскільки чинні нормативні документи визначають два значення гранично допустимих напружень в матеріалі проводу для короточасних режимів максимальних навантажень і мінімальних температур та для довготривалого експлуатаційного режиму, вибір вихідного режиму слід здійснювати саме серед цих трьох кліматичних режимів:

- 1) режиму мінімальних температур;
- 2) режиму максимальних навантажень
 - 2а) максимальної ожеледі;
 - 2б) вітру під час ожеледі;
 - 2в) максимального вітру;
- 3) експлуатаційного режиму.

Критерієм вибору вихідного режиму служать довжини критичних прогонів, для яких напруження проводу досягає допустимих значень у двох порівнюваних кліматичних режимах. Виходячи з наведених вище міркувань, практичний сенс мають три наступні критичні прогони.

Першим критичним називають прогін, в якому напруження проводу досягає своїх гранично допустимих значень в режимах мінімальних температур та в експлуатаційному режимі. Вираз для визначення першого критичного прогону має вигляд

$$l_{1кр} = \frac{\sigma_e^{доп}}{\gamma_1} \sqrt{\frac{\sigma_e^{доп} - \sigma_{max(-)}^{доп} + \alpha E (t_e - t_-)}{\frac{E}{24} \left[1 - \left(\frac{\sigma_e^{доп}}{\sigma_{max(-)}^{доп}} \right)^2 \right]}}. \quad (1.15)$$

Порівняння фактичного (зведеного) прогону з першим критичним дозволяє зробити наступні висновки (див. рис. 1.10):

1. Якщо фактичний (зведений) прогін менший за перший критичний, то напруження проводу набуває свого гранично допустимого значення в режимі мінімальних температур і цей режим слід прийняти як вихідний.

2. Якщо фактичний (зведений) прогін більший за перший критичний, то напруження проводу набуває свого гранично допустимого значення в експлуатаційному режимі і цей режим слід прийняти як вихідний.

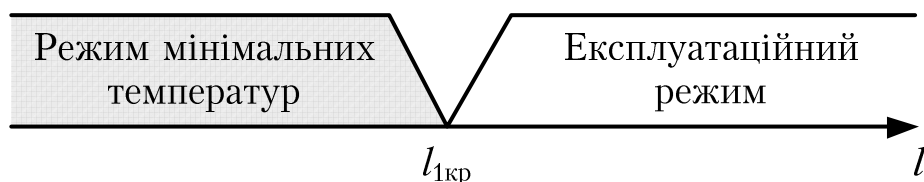


Рис. 1.10. Ілюстрація визначення вихідного режиму за першим критичним прогоном

Слід зазначити, що відповідно до виразу (1.15) можливі такі співвідношення між параметрами проводу та кліматичними умовами в порівнюваних режимах, коли довжина першого критичного прогону характеризується уявною величиною. У цьому разі як вихідний слід прийняти експлуатаційний режим за будь-якої довжини фактичного (зведеного) прогону.

Другим критичним називають прогін, в якому напруження проводу досягає своїх гранично допустимих значень в режимах мінімальних температур та максимальних навантажень:

$$l_{2кр} = \frac{\sigma_{\max(-)}^{\text{доп}}}{\gamma_1} \sqrt{\frac{24\alpha(t_o - t_-)}{\left(\frac{\gamma_{\max}}{\gamma_1}\right)^2 - 1}}. \quad (1.16)$$

Порівняння фактичного (зведеного) прогону з другим критичним дозволяє зробити наступні висновки.

1. Якщо довжина фактичного (зведеного) прогону менша за другий критичний прогін, то напруження проводу набуває свого максимального значення в режимі мінімальних температур і цей режим слід прийняти за вихідний.

2. Якщо довжина фактичного (зведеного) прогону більша за другий критичний прогін, то напруження проводу набуває свого максимального значення в режимі максимальних навантажень і цей режим слід прийняти за вихідний.

Правило визначення вихідного режиму за другим критичним прогоном проілюстровано на рис. 1.11.

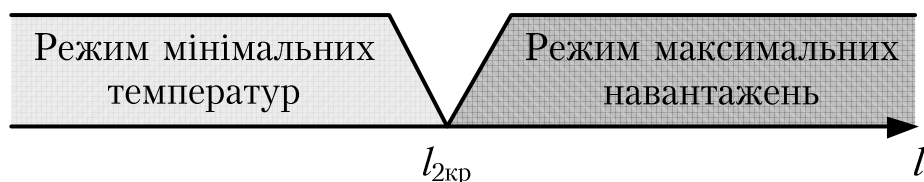


Рис. 1.11. Ілюстрація визначення вихідного режиму за другим критичним прогоном

Третім критичним називають прогін, в якому механічне напруження проводу досягає своїх гранично допустимих значень в експлуатаційному режимі та режимі максимальних навантажень. Довжину третього критичного прогону розраховують за виразом

$$l_{3кр} = \frac{\sigma_{\max(-)}^{\text{доп}}}{\gamma_1} \sqrt{\frac{\sigma_{\max(-)}^{\text{доп}} - \sigma_e^{\text{доп}} + \alpha E (t_o - t_e)}{\frac{E}{24} \left[\left(\frac{\gamma_{\max}}{\gamma_1} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{\max(-)}^{\text{доп}}}{\sigma_e^{\text{доп}}} \right)^2 \right]}}. \quad (1.17)$$

Порівняння фактичного прогону з третім критичним дозволяє зробити наступні висновки (див. рис. 1.12).

1. Якщо фактичний прогін менший за третій критичний, то напруження матеріалі проводу набуває свого допустимого значення в експлуатаційному режимі і цей режим слід прийняти як вихідний.

2. Якщо фактичний прогін більший за перший критичний, то напруження проводу набуває свого допустимого значення в режимі максимальних навантажень і цей режим слід прийняти як вихідний.

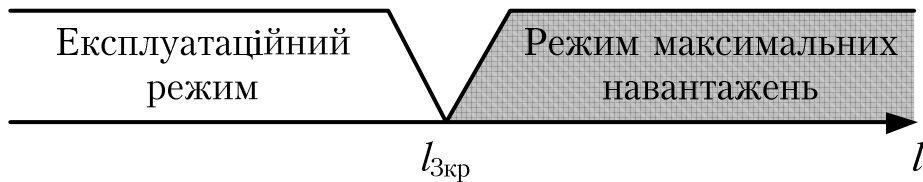


Рис. 1.12. Ілюстрація визначення вихідного режиму за третім критичним прогоном

Слід зазначити, що відповідно до виразу (1.17) можливі такі співвідношення між параметрами проводу в порівнюваних режимах, коли довжина третього критичного прогону характеризується уявною величиною. У цьому разі як вихідний слід прийняти експлуатаційний режим за будь-якої довжини фактичного прогону.

В практиці проектування повітряних ліній електропередавання вибір вихідного режиму реалізують на підставі порівняння розрахованих значень довжин трьох критичних прогонів між собою та з довжиною фактичного (зведеного) прогону. Тут розглядають п'ять характерних комбінацій.

$$1. l_{1кр} < l_{2кр} < l_{3кр}.$$

За такого співвідношення між критичними прогонами фактичний прогін лінії електропередавання необхідно порівнювати з першим та третім критичними прогонами. Якщо довжина фактичного прогону менша від першого критичного ($l < l_{1кр}$), за вихідний приймають режим мінімальних температур. Якщо довжина фактичного прогону перебуває в діапазоні між першим та третім критичними прогонами ($l_{1кр} < l < l_{3кр}$), за вихідний приймають експлуатаційний режим. Якщо довжина фактичного прогону більша за третій критичний ($l > l_{3кр}$), за вихідний приймають режим найбільших навантажень.

$$2. l_{1кр} > l_{2кр} > l_{3кр}.$$

У цьому разі фактичний прогін порівнюють з другим критичним. Якщо довжина фактичного прогону менша від другого критичного ($l < l_{2кр}$), за вихідний приймають режим мінімальних температур. В іншому разі ($l > l_{2кр}$) – режим найбільших навантажень.

3. $l_{1кр}$ уявний, $l_{2кр} < l_{3кр}$.

У цьому разі фактичний прогін необхідно порівнювати із третім критичним. Якщо довжина фактичного прогону менша від третього критичного ($l < l_{3кр}$), за вихідний приймають експлуатаційний режим. В іншому разі ($l > l_{3кр}$) – режим найбільших навантажень.

4. $l_{3кр}$ уявний, $l_{1кр} < l_{2кр}$.

За таких співвідношень фактичний прогін слід порівнювати з першим критичним. Якщо довжина фактичного прогону менша від першого критичного ($l < l_{1кр}$), за вихідний приймають режим мінімальних температур. В іншому разі ($l > l_{1кр}$) – експлуатаційний режим.

5. $l_{1кр}$ та $l_{3кр}$ уявні.

У цьому разі за вихідний обирають експлуатаційний режим за будь-якої довжини фактичного прогону.

Співвідношення щодо вибору вихідного кліматичного режиму зведені у табл. 1.8.

Таблиця 1.8. Співвідношення щодо вибору вихідного режиму

№	Співвідношення прогонів	Розрахунковий прогін	Критерій	Вихідний режим
1	$l_{1кр} < l_{2кр} < l_{3кр}$	$l_{1кр}$ і $l_{3кр}$	$l < l_{1кр}$	мінімальних температур
			$l_{1кр} < l < l_{3кр}$	експлуатаційний
			$l > l_{3кр}$	максимальних навантажень
2	$l_{1кр} > l_{2кр} > l_{3кр}$	$l_{2кр}$	$l < l_{2кр}$	мінімальних температур
			$l > l_{2кр}$	максимальних навантажень
3	$l_{1кр}$ уявний, $l_{2кр} < l_{3кр}$	$l_{3кр}$	$l < l_{3кр}$	експлуатаційний
			$l > l_{3кр}$	максимальних навантажень
4	$l_{3кр}$ уявний, $l_{1кр} < l_{2кр}$	$l_{1кр}$	$l < l_{1кр}$	мінімальних температур
			$l > l_{1кр}$	експлуатаційний
5	$l_{1кр}, l_{3кр}$ уявний	–	–	експлуатаційний

1.4. СИСТЕМАТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК ПРОВІДІВ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ

Під час виконання механічних розрахунків повітряних ліній визначають три групи експлуатаційних режимів:

- 1) нормальні режими;
- 2) аварійні режими;
- 3) монтажні режими.

Нормальним називають режим повітряної лінії за необірваних проводів та тросів. В таких режимах конструктивні елементи лінії зазнають дію постійних та короткочасних навантажень відповідно до поєднання кліматичних навантажень та впливів.

Аварійним режимом називають роботу лінії за обриву проводів та (або) тросів. В таких режимах конструктивні елементи лінії зазнають аварійних навантажень, зокрема опори зазнають дію згинальних та (або) обертаючих моментів. Тривалість дії навантажень аварійного режиму відносно мала. Тому для таких навантажень встановлено менші коефіцієнти запасу, чим для навантажень нормальних режимів. Іншими словами, навантаження аварійних режимів можуть перевищувати навантаження нормальних режимів.

Монтажним режимом називають роботу конструкцій в умовах монтажу опор, проводів та тросів лінії. Тут елементи лінії зазнають дію монтажних навантажень, зокрема опори можуть зазнавати дію згинальних та (або) обертаючих моментів, обумовлених неповним монтажем проводів та тросів лінії.

Загалом можна виявити нескінчену кількість можливих сполучень кліматичних умов. Проте в практиці аналізу механічних навантажень на конструктивні елементи повітряних ліній зазвичай розглядають розрахункові кліматичні режими, які визначаються комбінаціями кліматичних умов, зазначених в табл. 1.9.

В нормальних режимах повітряних ліній розглядають наступні розрахункові кліматичні режими.

I. *Експлуатаційний режим.* Ожеледь і вітер відсутні, температура дорівнює середньорічній. Режим розраховують для перевірки допустимості механічного напруження проводу в довготривалому експлуатаційному режимі. У цьому режимі також здійснюють контроль захисту від вібрації проводів.

II. *Режим максимальної температури.* Вітер відсутній, температура повітря максимальна. У цьому режимі можлива максимальна стріла провисання і мінімальний габарит. Режим розраховують для контролю габариту лінії.

Таблиця 1.9. Сполучення кліматичних умов
для розрахунків повітряних ліній

Режим	Температура повітря	Навантаження від вітру	Навантаження від ожеледі
Нормальний	середньорічна	—	—
	найвища	—	—
	найнижча	—	—
	під час ожеледі	—	максимальне
	під час ожеледі	максимальне	—
	середньорічна	під час ожеледі	90% від максимального
Аварійний	середньорічна	—	—
	найнижча	—	—
	під час ожеледі	—	максимальне
Монтажний	-15°C	натиск вітру на висоті 10 м над поверхнею землі 62,5 Па	—

III. *Режим мінімальної температури.* Вітер та ожеледь відсутні, температура повітря мінімальна. Режим розраховують для визначення мінімальної стріли провисання і контролю напруження проводу, яке може досягати своїх допустимих значень. Також в цьому режимі здійснюють перевірку гірлянд ізоляторів на підсікання проводів.

IV. *Режим максимальної ожеледі.* Навантаження від ожеледі максимальне, вітер відсутній, температура повітря відповідає температурі утворення ожеледі. У цьому режимі можливе максимальне вертикальне навантаження і мінімальна габаритна відстань від проводу до землі або інженерних споруд. Даний режим розраховують для контролю габариту лінії та напруження проводу.

V. *Вітровий режим.* Навантаження від ожеледі відсутнє, навантаження від натиску вітру максимальне, температура повітря відповідає температурі найбільшої швидкості вітру (температурі утворення ожеледі). У цьому режимі можливе виникнення максимального напруження проводів та тросів. Тут здійснюють перевірку допустимості напруження проводів та тросів, а також контролюють відстані від проводів у відхиленому стані до конструктивних елементів опори.

VI. *Режим вітру під час ожеледі.* Навантаження від вітру відповідає режиму вітру під час ожеледі, навантаження від ожеледі становить 90% максимального, температура повітря відповідає температурі утворення ожеледі. У цьому режимі механічне напруження проводів та тросів може

досягати свого допустимого значення. Режим розраховують з метою контролю тяжіння проводів та тросів лінії, а також для перевірки ізоляційних проміжків між металевими частинами опор та проводами лінії у відхиленому внаслідок дії вітру стані.

Під час проектування повітряних ліній можуть виконуватись механічні розрахунки для будь-яких інших кліматичних умов, обумовлених особливостями проходження траси лінії електропередавання. Так, наприклад, у разі перетинання повітряних ліній між собою нормативні документи встановлюють допустимі відстані між найближчими проводами (або проводами та тросами) за температури повітря $+15^{\circ}\text{C}$ без вітру.

У разі наближення або перетинання повітряною лінією залізниць додатково обов'язково проводять розрахунки у режимі максимальних електричних навантажень, коли температура проводу визначається не тільки кліматичними умовами в районі траси лінії, а й нагріванням проводів робочими струмами. Тут, у разі відсутності інформації про електричні навантаження повітряної лінії приймають максимально допустиму температуру проводу $+70^{\circ}$ (для традиційних сталевалюмінієвих проводів). Такий режим розраховують для контролю габаритних відстаней між проводами повітряної лінії та контактною мережею та іншими елементами залізниці.

Для виконання механічного розрахунку грозозахисного тросу повітряної лінії визначають також стан проводу за температури $+15^{\circ}\text{C}$ в безвітряну погоду. Такий режим, інколи, називають режимом грозового періоду.

Систематичний розрахунок проводів та тросів виконують з метою контролю технологічних вимог до конструкцій повітряних ліній електропередавання у всіх можливих кліматичних умовах. Такий розрахунок полягає у визначенні напруження в матеріалі проводу або тросу за рівнянням стану проводу у прогоні для всіх розрахункових кліматичних режимів

$$\sigma - \frac{\gamma^2 El^2}{24\sigma^2} = \sigma_0 - \frac{\gamma_0^2 El^2}{24\sigma_0^2} - \alpha E(t - t_0). \quad (1.18)$$

Рівняння стану проводу у прогоні (1.18) являє собою неповне кубічне рівняння

$$\sigma - \frac{A}{\sigma^2} = B,$$

або

$$\sigma^3 - B\sigma^2 - A = 0. \quad (1.19)$$

$$\frac{\gamma^2 El^2}{24} = A; \quad \sigma_0 - \frac{\gamma_0^2 El^2}{24\sigma_0^2} - \alpha E(t - t_0) = B,$$

де $A = \frac{\gamma^2 E l^2}{24}$; $B = \sigma_0 - \frac{\gamma_0^2 E l^2}{24 \sigma_0^2} - \alpha E (t - t_0)$.

Фізичний зміст має лише дійсний додатний корінь рівняння (1.19). Такий корінь можна визначити за аналітичним виразом

$$\sigma = \frac{B}{3} + C + \frac{B^2}{9C}, \quad (1.20)$$

де

$$C = \sqrt[3]{\frac{A}{2} + \frac{B^3}{27}} + \sqrt{\frac{A^2}{4} + A \frac{B^3}{27}}.$$

Вираз (1.20) дозволяє визначити механічне напруження в матеріалі проводу у будь-якому можливому кліматичному режимі експлуатації повітряної лінії, якщо відомі характеристики проводу у будь-якому іншому режимі.

Також під час виконання систематичного розрахунку проводів повітряної лінії визначають стріли провисання проводу за виразом

$$f = \frac{\gamma l^2}{8\sigma}, \quad (1.21)$$

де γ – питоме навантаження у поточному режимі; σ – напруження проводу у поточному режимі.

1.5. КРИТИЧНА ТЕМПЕРАТУРА

Однією з цілей проектування механічної частини повітряної лінії електропередавання є дотримання конструкцією лінії в будь-яких можливих кліматичних умовах нормованих габаритних відстаней між проводами лінії і землею та інженерними спорудами. Тут особливої уваги заслуговує режим, за якого спостерігається найбільша стріла провисання проводу в прогоні. Очевидно, якщо в цьому режимі не буде порушуватися нормований габарит, то в будь-якому іншому можливому кліматичному режимі допустимі габаритні відстані будуть також дотримані.

Найбільша стріла провисання може спостерігатися або за малих значень механічної напруги в матеріалі проводу (режим максимальних температур), або за найбільших вертикальних механічних навантажень (режим максимальної ожеледі).

Критерієм визначення кліматичного режиму найбільшої стріли провисання, служить критична температура. Розглянемо зміну форми кривої провисання проводу в прогоні протягом року, як показано на рис. 1.13, де індексом 1 позначено положення проводу в режимі максимальної ожеледі.

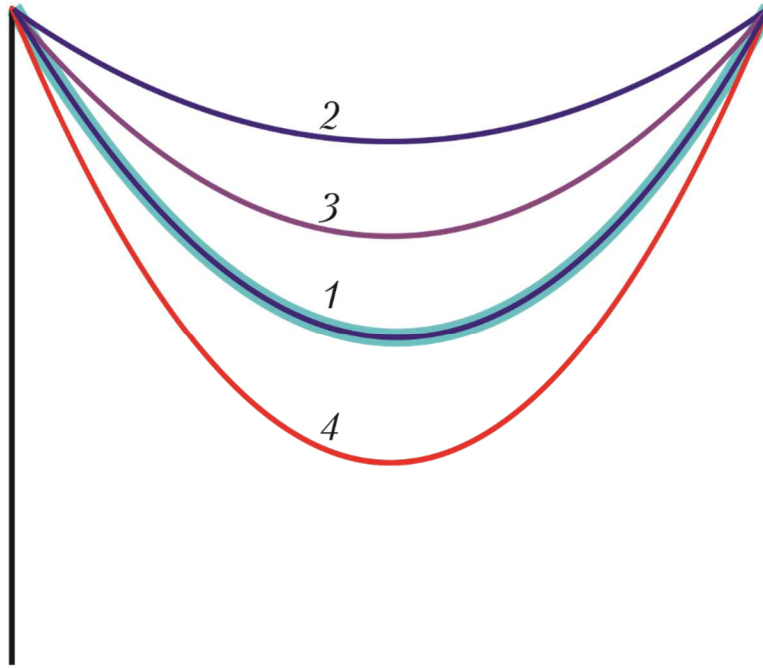


Рис. 1.13. До визначення критичної температури

Із збільшенням температури повітря, під час відлиги спостерігається скидання ожеледі, провід приймає положення, позначене індексом 2. Далі, із зростанням температури повітря, стріла провисання проводу буде збільшуватися, і провід прийматиме положення, позначені індексами 3 та 4. Очевидно, що за певної температури провід прийме таке саме положення, що й за максимальної ожеледі. Таку температуру називають критичною.

Критичну температуру визначають за виразом

$$t_{\text{кр}} = t_o + \frac{\sigma_o}{\alpha E} \left(1 - \frac{\gamma_1}{\gamma_3} \right). \quad (1.22)$$

Із зіставлення критичної температури з максимальною можна зробити такі висновки:

- 1) якщо максимальна температура більша критичної, то найбільша стріла провисання спостерігається за максимальної температури;
- 2) якщо максимальна температура нижче критичної, то найбільша стріла провисання спостерігається за максимальної ожеледі.

Зазначимо, що в оціночних розрахунках допустимо підставляти у вираз (1.22) значення допустимого напруження в режимі максимальних навантажень.

1.6. РОЗРАХУНОК АВАРІЙНОГО РЕЖИМУ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ

Аварійним режимом повітряної лінії електропередавання називають режим, обумовлений обривом одного або декількох фазних проводів або грозозахисних тросів. Такі аварії призводять до того, що проводи та троси вцілілих прогонів зазнають однобічного тяжіння. Це викликає два явища, які спостерігаються в конструктивних елементах повітряних ліній.

1. Через однобічне тяжіння проводів та тросів порушуються умови рівноваги сил, які діють на конструктивні елементи опор повітряних ліній. Це призводить до виникнення згинаючих моментів.

2. Через однобічне тяжіння проводів та тросів спостерігається відхилення гірлянд ізоляторів у бік вцілілих прогонів. Це призводить до зменшення довжин прогонів та механічного напруження в матеріалі проводів та тросів, збільшення стріл провисання та зменшення габаритних відстаней між проводом та землею або інженерною спорудою.

Очевидно, що обидва розглянуті явища обумовлюють *редукцію* – зміну тяжіння проводу через переміщення у просторі точок закріплення. У першому разі це пов'язане із деформацією опор через дію згинаючих або обертових моментів, а у другому – із відхиленням ізоляційних підвісів від вертикального положення.

Коефіцієнт, який дорівнює відношенню редукованого тяжіння до тяжіння в нормальному доаварійному режимі називають *коефіцієнтом редукції*.

Очевидно, що в аварійних режимах редуковане тяжіння завжди менше тяжіння в доаварійному режимі, тобто коефіцієнт редукції в аварійних режимах завжди менший за одиницю.

Залежність горизонтального переміщення точки закріплення проводу від редукованого тяжіння має вигляд

$$\Delta l = \frac{1}{EF} (H_0 - H) - \frac{p_0^2 l^3}{24} \left(\frac{1}{H_0^2} - \frac{1}{H^2} \right). \quad (1.23)$$

Розглянемо найпростіший випадок розрахунку редукованого тяжіння у прогоні, суміжному з анкерною опорою у разі обриву проводу у другому прогоні. Для схеми на рис. 1.14 це відповідає задачі розрахунку редукованого тяжіння на ділянці між опорами №1 та №2.

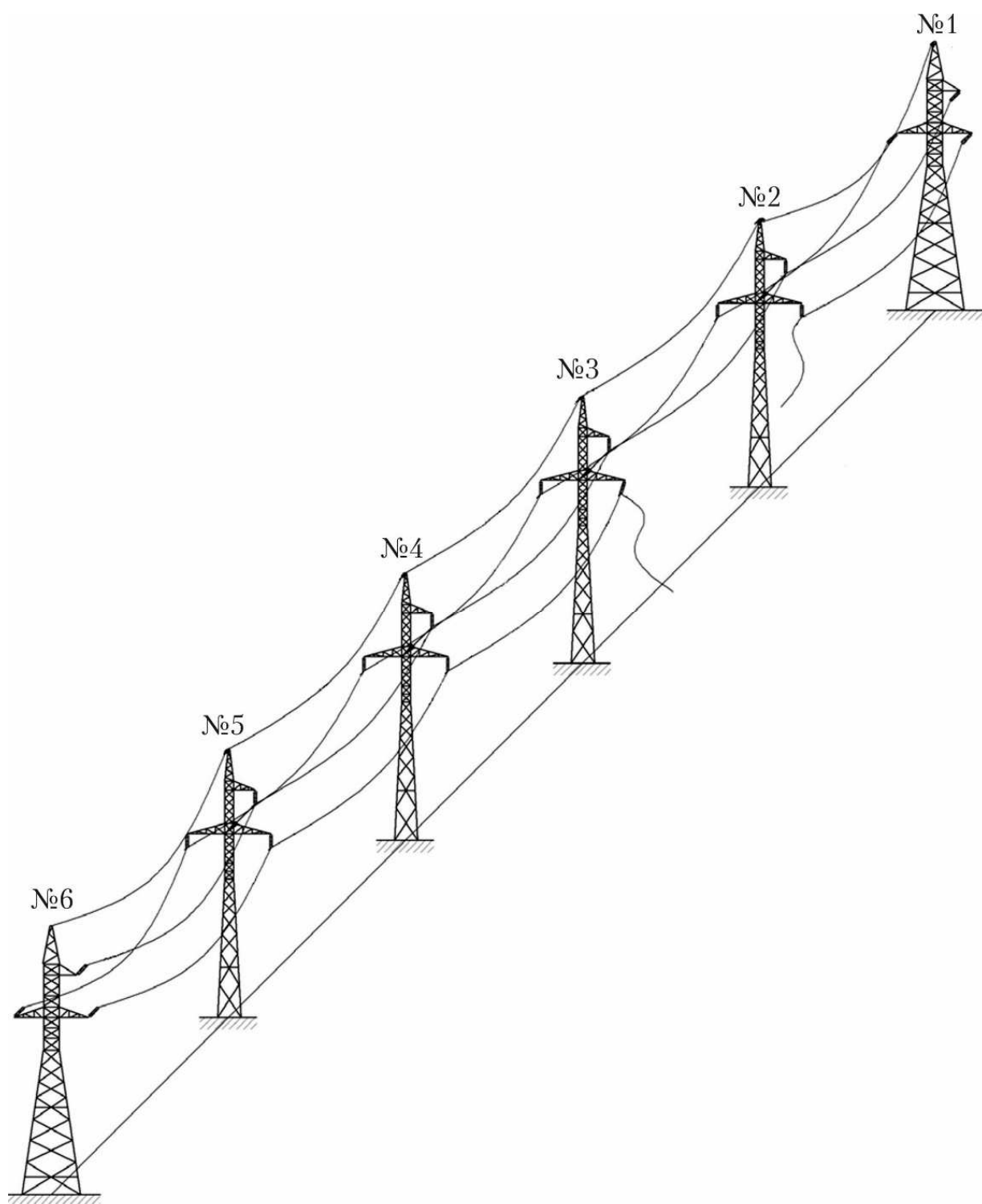


Рис. 1.14. Схема аварії на анкерованій ділянці повітряної лінії

В такому разі переміщення точки закріплення проводу на опорі визначають за виразом

$$\Delta l = \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_0 l + G_\Gamma}{2H} \right)^2}}. \quad (1.24)$$

Якщо дорівняти між собою рівняння (1.23) та (1.24) отримуємо

$$\frac{1}{EF} (H_0 - H) - \frac{p_0^2 l^3}{24} \left(\frac{1}{H_0^2} - \frac{1}{H^2} \right) = \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_0 l + G_\Gamma}{2H} \right)^2}}. \quad (1.25)$$

Розв'язання рівняння (1.25) дозволяє визначити шукане редуковане тяжіння в матеріалі проводу в аварійному режимі повітряної лінії.

Слід зазначити, що рівняння (1.25) є складним нелінійним рівнянням, що не має аналітичного розв'язку. Для розв'язання цього рівняння слід користуватися числовими ітераційними методами, наприклад, методом Ньютона. Відповідно до методу Ньютона ітераційна формула послідовного уточнення редукованого тяжіння має вигляд

$$H_{(n+1)} = H_{(n)} - \frac{f(H_{(n)})}{f'(H_{(n)})},$$

де n – індекс поточної ітерації;

$$f(H_{(n)}) = \frac{1}{EF} (H_0 - H_{(n)}) - \frac{p_0^2 l^3}{24} \left(\frac{1}{H_0^2} - \frac{1}{H_{(n)}^2} \right) - \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_0 l + G_\Gamma}{2H_{(n)}} \right)^2}};$$

$$f'(H_{(n)}) = -\frac{1}{EF} - \frac{p_0^2 l^3}{12H_{(n)}^3} - \frac{\lambda (p_0 l + G_\Gamma)^2}{4H_{(n)}^3 \left(1 + \left(\frac{p_0 l + G_\Gamma}{2H_{(n)}} \right)^2 \right)^{3/2}}.$$

Зазначимо, що розв'язання задачі визначення редукованого тяжіння за методом Ньютона дуже чутливе до вибору початкових наближень. Часто трапляються випадки, коли призначення за початкове наближення значення тяжіння в доаварійному режимі призводить до виявлення кореня нелінійного рівняння (1.25), що не має фізичного змісту (наприклад, виявлення від'ємного кореня).

2. ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ МЕХАНІЧНОГО РОЗРАХУНКУ ПРОВОДІВ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ

Завдання. Реалізувати систематичний розрахунок проводів повітряної лінії електропередавання напругою 110 кВ, яка виконана сталелегатурними проводами марки АС-240/39, змонтованими на проміжних багатограних опорах ПМ-110-1ф з використанням стрижневих полімерних ізоляторів ЛК 70/110-3. Траса повітряної лінії проходить по ненаселеній сільській місцевості II типу, яку віднесено до 3 району за ожеледдю, 1 району за вітровим навантаженням, 2 району за вітровим натиском під час ожеледі. Анкерована ділянка містить п'ять прогонів довжинами 260, 240, 245, 255 та 250 м.

Відповідно до умов завдання технічні та експлуатаційні характеристики проводу АС-240/39 становлять

- розрахунковий переріз $F := 274.67 \text{ мм}^2$
- зовнішній діаметр $d := 21.6 \text{ мм}$
- погонна маса $M_0 := 952 \frac{\text{кг}}{\text{км}}$
- модуль пружності $E := 82.5 \text{ ГПа}$
- коефіцієнт теплового здовження $\alpha := 19.2 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$

Допустимі напруження

- в режимі максимальних навантажень $\sigma_{max} := 135 \text{ МПа}$
- в експлуатаційному режимі $\sigma_e := 90 \text{ МПа}$

Довжини прогонів

$$l_1 := 260 \text{ м} \quad l_2 := 240 \text{ м} \quad l_3 := 245 \text{ м} \quad l_4 := 255 \text{ м} \quad l_5 := 250 \text{ м}$$

Умови в районі траси лінії характеризуються наступними характеристичними значеннями кліматичних навантажень:

- товщина стінки ожеледі $b := 19 \text{ мм}$
- швидкісний натиск вітру $q := 400 \text{ Па}$

- натиск вітру під час ожеледі	$q' := 200 \text{ Па}$
Температурні режими проводу	
- максимальна температура	$t_{max} := 36 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- мінімальна температура	$t_{min} := -36 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- температура під час ожеледі	$t_o := -5 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- середньорічна температура	$t_e := 8 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- температура монтажного режиму	$t_{mnt} := -15 \text{ }^{\circ}\text{C}$

2.1. РОЗРАХУНОК СЕРЕДНЬОЇ ВИСОТИ РОЗТАШУВАННЯ ЦЕНТРУ МАС ПРОВОДІВ ТА ЗВЕДЕНОГО ПРОГОНУ АНКЕРОВАНОЇ ДІЛЯНКИ

Конструктивні розміри проміжної опори ПМ-110-1ф та лінійного ізолятора ЛК 700/110-3 зазначено на рис. 2.2 та 2.3 відповідно.

Конструктивні розміри опори ПМ-110-1ф становлять

- | | |
|----------------------------|---|
| - висота нижніх траверс | $h_1 := 15 \text{ м}$ |
| - висота верхньої траверси | $h_3 := h_1 + 4 \text{ м} = 19 \text{ м}$ |

Будівельна висота ізоляційного підвісу ЛК 70/110-3

$$\lambda := 1280 \text{ мм}$$

Відповідно до схеми опори на рис. 2.2 висота закріплення нижнього проводу на опорі дорівнює

$$h_0 := h_1 - \lambda = 13.72 \text{ м}$$

Середня висота закріплення проводів на опорі становить

$$h_{сер} := \frac{2 h_1 + h_3}{3} - \lambda = 15.053 \text{ м}$$

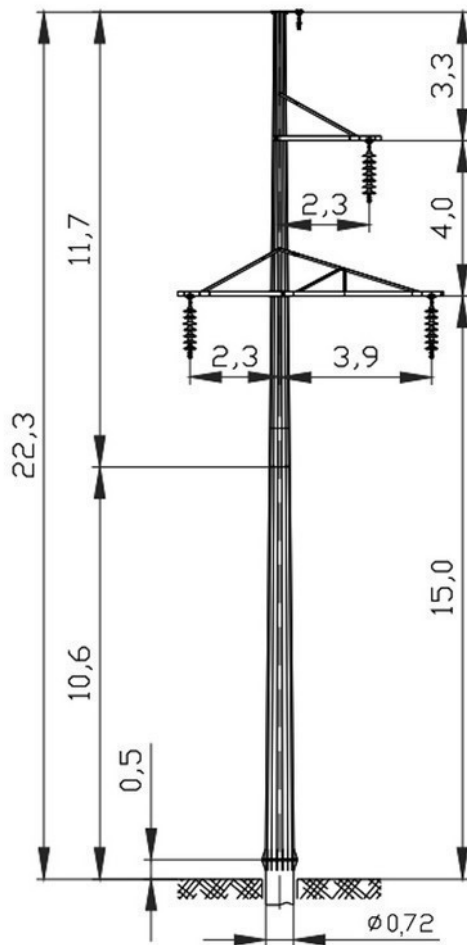


Рис. 2.2. Проміжна опора
ПМ-110-1ф

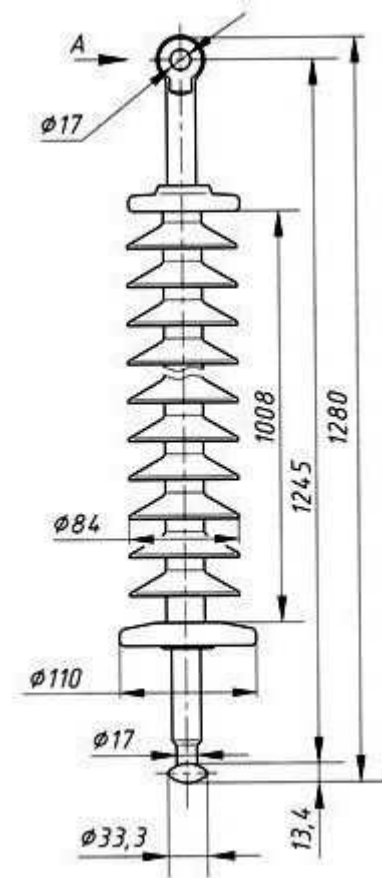


Рис. 2.3. Ізоляційний підвіс
ЛК 70/110-3

Нормована габаритна відстань між проводом та землею лінії напругою 110 кВ для ненаселеної місцевості за даними табл. Д.4 дорівнює

$$\Gamma := 6 \text{ м}$$

Таким чином, габаритна стріла провисання проводу за виразом (1.3) становить

$$f_z := h_0 - \Gamma = 7.72 \text{ м}$$

Отже, відповідно до виразу (1.2) висота розташування зведеного центру мас всіх фазних проводів у прогоні дорівнює

$$h_c := h_{сер} - \frac{2}{3} f_z = 9.907 \text{ м}$$

Визначимо довжину зведеного прогону без урахування перепадів висот точок закріплення проводу на опорах. За виразом (1.4) такий параметр становить

$$l_{зв} := \sqrt{\frac{l_1^3 + l_2^3 + l_3^3 + l_4^3 + l_5^3}{l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5}} = 250.3 \text{ м}$$

2.2. РОЗРАХУНОК ОДИНИЧНИХ ТА ПИТОМИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ПРОВІДИ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ

Лінії електропередавання напругою 110 кВ віднесено до класу безвідмовності ЗКБ, що визначає середній період повторюваності експлуатаційних навантажень 15 років (див. дані табл. 1.1).

1. Навантаження від власної ваги проводу

Відповідно до виразів (1.5) та (1.6) одиничні та питомі навантаження від власної ваги проводу становлять:

$$p_1 := g \cdot M_0 = 9.336 \frac{\text{Н}}{\text{м}} \qquad \gamma_1 := \frac{p_1}{F} = 33.99 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}$$

2. Навантаження від ваги відкладень ожеледі

$$\text{Густина льоду} \qquad \rho := 0.9 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$$

За даними табл. 1.2 для ліній класу безперебійності ЗКБ коефіцієнт надійності за вагою ожеледі дорівнює

$$\gamma_{fm} := 0.7$$

Поправковий коефіцієнт за висотою розташування проводу визначимо за методом лінійної інтерполяції даних, наведених в табл. 1.3:

h (м)	k
5	0.8
10	1.0

$$k := k_0 + \frac{(h_c - h_0)(k_1 - k_0)}{h_1 - h_0} = 0.996$$

В аналогічний спосіб визначимо поправковий коефіцієнт щодо діаметру проводу

$diam$ (мм)	μ
20	0.9
30	0.8

$$\mu := \mu_0 + \frac{(d - diam_0)(\mu_1 - \mu_0)}{diam_1 - diam_0} = 0.884$$

Таким чином, відповідно до виразу (1.7) одиничне навантаження від ваги відкладень ожеледі становить

$$p_2 := \rho \cdot g \cdot \gamma_{fm} \cdot \pi \cdot k \cdot \mu \cdot b \cdot (d + k \cdot \mu \cdot b) = 12.45 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$$

3. Сумарне навантаження від ваги проводу, вкритого ожеледдю

За виразами (1.8) одиничні та питомі навантаження від ваги проводу, вкритого ожеледдю становлять:

$$p_3 := p_1 + p_2 = 21.786 \frac{\text{Н}}{\text{м}} \quad \gamma_3 := \frac{p_3}{F} = 79.317 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}$$

4. Навантаження від натиску вітру

За даними табл. 1.2 для ліній класу безперебійності ЗКБ коефіцієнт надійності за вітровим навантаженням дорівнює

$$\gamma_{fmax} := 0.8$$

Оскільки діаметр проводу перевищує 20 мм, аеродинамічний коефіцієнт становить

$$C_x := 1.1$$

Визначимо складові коефіцієнту динамічності натиску вітру. За даними табл. 1.4 коефіцієнт впливу пульсаційного складника для сільської місцевості (тип II) дорівнює

$$q_{tu} := 1.5$$

Коефіцієнт нерівномірності натиску вітру вздовж прогону

$$\alpha_- := 2.6 - 0.3 \ln(q \cdot Pa^{-1}) = 0.803$$

Коефіцієнт довжини прогону

$$K_l := 1.7 - 0.12 \ln(l_{36} \cdot m^{-1}) = 1.037$$

Отже, відповідно до виразу (1.10), коефіцієнт динамічності натиску вітру дорівнює

$$C_{dc} := q_{tu} \cdot \alpha_- \cdot K_l = 1.249$$

Коефіцієнт висоти розташування проводу визначаємо з урахуванням параметрів табл. 1.6:

$$C_h := 1 \left(0.1 \cdot h_c \cdot m^{-1} \right)^{2 \cdot 0.15} = 0.997$$

Решта складових коефіцієнту впливу розташування проводів (коефіцієнти рельєфу та напрямку вітру) дорівнюють одиниці:

$$C_R := 1 \qquad C_{DIR} := 1$$

Отже, за виразом (1.11) коефіцієнт впливу розташування проводів становить

$$C_c := C_h \cdot C_R \cdot C_{DIR} = 0.997$$

Таким чином, відповідно до виразу (1.9) одиничне навантаження від натиску вітру дорівнює

$$p_4 := \gamma_{fmax} \cdot C_x \cdot C_{dc} \cdot C_c \cdot q \cdot d = 9.468 \frac{H}{m}$$

5. Навантаження від натиску вітру на проводи, вкриті ожеледдю

За даними табл. 1.2 для ліній класу безперебійності ЗКБ коефіцієнт надійності за вітровим навантаженням під час ожеледі дорівнює

$$\gamma_{fQ} := 0.71$$

Оскільки в даному режимі проводи вкриті ожеледдю, аеродинамічний коефіцієнт дорівнює

$$C_x := 1.2$$

Коефіцієнт нерівномірності натиску вітру вздовж прогону для режиму вітру під час ожеледі становить

$$\alpha'_- := 2.6 - 0.3 \cdot \ln(q' \cdot Pa^{-1}) = 1.011$$

Оскільки даний коефіцієнт не має перевищувати одиниці, фіксуємо його на порушеній межі, тобто

$$\alpha'_- := 1$$

Решта складових коефіцієнту динамічності натиску вітру такі самі, що й в режимі максимального вітру. Отже

$$C'_{dc} := q_{tu} \cdot \alpha'_- \cdot K_l = 1.556$$

Коефіцієнт впливу розташування проводів залишається таким самим, що й в режимі максимального вітру.

Таким чином, відповідно до (1.12) одиничне навантаження від натиску вітру під час ожеледі становить

$$p_5 := \gamma_{fQ} \cdot C_x \cdot C'_{dc} \cdot C_c \cdot q' \cdot d = 5.711 \frac{H}{m}$$

6. Сумарне навантаження від ваги проводу та натиску вітру.

Відповідно до виразу (1.13) одиничне та питоме навантаження від ваги проводу, вкритого ожеледдю становлять:

$$p_6 := \sqrt{p_1^2 + p_5^2} = 10.944 \frac{H}{m} \quad \gamma_6 := \frac{p_6}{F} = 39.844 \frac{\kappa Pa}{m}$$

7. Сумарне навантаження від ваги проводу, вкритого ожеледдю та натиску вітру.

З виразом (1.14) одиничні та питомі навантаження від ваги проводу, вкритого ожеледдю та натиску вітру становлять:

$$p_7 := \sqrt{(p_1 + 0.9 \cdot p_2)^2 + p_6^2} = 23.274 \frac{H}{m} \quad \gamma_7 := \frac{p_7}{F} = 84.736 \frac{\kappa Pa}{m}$$

Зіставлення сумарних навантажень від ваги проводу вкритого ожеледдю, ваги проводу та натиску вітру, а також ваги проводу, вкритого ожеледдю та натиску вітру визначає що режимом максимальних навантажень є режим вітру під час ожеледі. Дійсно

$$p_7 > p_3 > p_6 \quad 23.275 \frac{H}{м} > 21.786 \frac{H}{м} > 10.944 \frac{H}{м}$$

$$\gamma_7 > \gamma_3 > \gamma_6 \quad 84.737 \frac{кПа}{м} > 79.317 \frac{кПа}{м} > 39.846 \frac{кПа}{м}$$

Отже

$$\gamma_{max} := \gamma_7 = 84.736 \frac{кПа}{м}$$

2.3. ВИЗНАЧЕННЯ ВИХІДНОГО КЛІМАТИЧНОГО РЕЖИМУ

За виразами (1.15) – (1.17) розрахуємо довжини критичних прогонів:

1. Перший критичний прогін

$$l_{1к} := \frac{\sigma_e}{\gamma_1} \sqrt{\frac{\sigma_e - \sigma_{max} + \alpha \cdot E \cdot (t_e - t_{min})}{\frac{E}{24} \left(1 - \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_{max}} \right)^2 \right)}} = 301.109 \text{ м}$$

2. Другий критичний прогін

$$l_{2к} := \frac{\sigma_{max}}{\gamma_1} \sqrt{\frac{24 \alpha \cdot (t_o - t_{min})}{\left(\frac{\gamma_{max}}{\gamma_1} \right)^2 - 1}} = 207.872 \text{ м}$$

3. Третій критичний прогін

$$l_{3к} := \frac{\sigma_{max}}{\gamma_1} \sqrt{\frac{\sigma_{max} - \sigma_e + \alpha \cdot E \cdot (t_o - t_e)}{\frac{E}{24} \left(\left(\frac{\gamma_{max}}{\gamma_1} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{max}}{\sigma_e} \right)^2 \right)}} = 168.077 \text{ м}$$

Отже, співвідношення між критичними прогонами становить

$$l_{1к} > l_{2к} > l_{3к} \quad 301.109 \text{ м} > 207.87 \text{ м} > 168.075 \text{ м}$$

Це означає, що розрахунковим є другий критичний прогін, з яким слід порівнювати фактичний (зведений) прогін

$$l_{зв} > l_{2к} \quad 250.3 \text{ м} > 207.87 \text{ м}$$

Таке співвідношення визначає, що, відповідно до методу допустимих напружень, вихідним є режим максимальних навантажень, тобто режим вітру під час ожеледі.

2.4. СИСТЕМАТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК ПРОВОДІВ

Відповідно до методу допустимих напружень, вихідним є режим максимальних навантажень (режим вітру під час ожеледі). Тобто

- питоме навантаження $\gamma_0 := \gamma_7 = 84.736 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}$
- напруження проводу $\sigma_0 := \sigma_{max} = 135 \text{ МПа}$
- температура проводу $t_0 := t_o = -5 \text{ }^\circ\text{C}$

Розрахунки стану проводу будемо виконувати для таких кліматичних режимів:

- 1) експлуатаційний
- 2) максимальної температури
- 3) мінімальної температури
- 4) максимальної ожеледі
- 5) максимального вітру
- 6) вітру під час ожеледі
- 7) грозового періоду
- 8) монтажний

Розглянемо стан проводу в експлуатаційному режимі повітряної лінії.

Розрахункові параметри проводу в даному режимі становлять

- питоме навантаження $\gamma := \gamma_1 = 33.99 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}$
- температура проводу $t := t_e = 8 \text{ }^\circ\text{C}$

Напруження проводу визначимо за виразом (1.20):

$$A := \frac{1}{24} \gamma^2 \cdot E \cdot l_{36}^2 = (2.488 \cdot 10^5) \text{ МПа}^3$$

$$B := \sigma_0 - \frac{\gamma_0^2 E \cdot l_{36}^2}{24 \sigma_0^2} - \alpha \cdot E \cdot (t - t_0) = 29.562 \text{ МПа}$$

$$C := \sqrt[3]{\frac{A}{2} + \frac{B^3}{27}} + \sqrt{\frac{A^2}{4} + \frac{A \cdot B^3}{27}} = 63.056 \text{ МПа}$$

$$\sigma := \frac{B}{3} + C + \frac{B^2}{9 C} = 74.45 \text{ МПа}$$

Стріла провисання проводу в даному режимі за виразом (1.21) становить

$$f := \frac{\gamma \cdot l_{36}^2}{8 \sigma} = 3.575 \text{ м}$$

В аналогічний спосіб виконуємо розрахунки стану проводу для решти розрахункових кліматичних режимів. Для виконання таких обчислень сформуємо матрицю параметрів розрахункових режимів повітряної лінії

<i>режим</i>	<i>t</i>	<i>γ</i>
<i>експлуатаційний</i>	<i>t_e</i>	<i>γ₁</i>
<i>макс.температури</i>	<i>t_{max}</i>	<i>γ₁</i>
<i>мін.температури</i>	<i>t_{min}</i>	<i>γ₁</i>
<i>макс.ожеледі</i>	<i>t_o</i>	<i>γ₃</i>
<i>макс.вітру</i>	<i>t_o</i>	<i>γ₆</i>
<i>вітер_ожеледь</i>	<i>t_o</i>	<i>γ₇</i>
<i>грозовий_період</i>	15 °C	<i>γ₁</i>
<i>монтажний</i>	−15 °C	<i>γ₁</i>

Для розрахунку напруження проводу у розрахункових режимах організуємо циклічні обчислення за виразом (1.20)

$$\sigma := \left\| \begin{array}{l} \text{for } i \in \text{експлуатаційний} \dots \text{монтажний} \\ \left\| \begin{array}{l} A_i \leftarrow \frac{1}{24} \gamma_i^2 \cdot E \cdot l_{3\phi}^2 \\ B_i \leftarrow \sigma_0 - \frac{\gamma_0^2 E \cdot l_{3\phi}^2}{24 \sigma_0^2} - \alpha \cdot E \cdot (t_i - t_0) \\ C_i \leftarrow \sqrt[3]{\frac{A_i}{2} + \frac{B_i^3}{27}} + \sqrt{\frac{A_i^2}{4} + \frac{A_i B_i^3}{27}} \\ \sigma_i \leftarrow \frac{B_i}{3} + C_i + \frac{B_i^2}{9 C_i} \end{array} \right\| \\ \sigma \leftarrow \sigma \end{array} \right\|$$

Таким чином, вектор-стовпці напружень проводу та стріл провисання мають вигляд

$$\sigma = \begin{bmatrix} 74.45 \\ 58.332 \\ 117.331 \\ 130.145 \\ 91.231 \\ 135 \\ 69.695 \\ 94.095 \end{bmatrix} \text{ МПа} \qquad f := \frac{\gamma \cdot l_{3\phi}^2}{8 \sigma} = \begin{bmatrix} 3.575 \\ 4.563 \\ 2.269 \\ 4.773 \\ 3.42 \\ 4.915 \\ 3.819 \\ 2.829 \end{bmatrix} \text{ м}$$

Результати виконання систематичного розрахунку проводу зведемо в таблицю

<i>режим</i>	<i>t</i> (°C)	<i>γ</i> $\left(\frac{\kappa\text{Па}}{\text{м}}\right)$	<i>σ</i> (МПа)	<i>f</i> (м)
<i>експлуатаційний</i>	8	33.99	74.45	3.575
<i>макс.температури</i>	36	33.99	58.3329	4.563
<i>мін.температури</i>	−36	33.99	117.331	2.269
<i>макс.ожеледі</i>	−5	79.317	130.145	4.773
<i>макс.вітру</i>	−5	39.846	91.231	3.42
<i>вітер_ожеледь</i>	−5	84.737	135	4.915
<i>грозовий_період</i>	15	33.99	69.695	3.819
<i>монтажний</i>	−15	33.99	94.095	2.829

Зазначимо, що в режимах максимального вітру та вітру під час ожеледі стріли провисання розраховано у нахилений площині, обумовлений відхиленням проводу під натиском вітру.

Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що в жодному розрахунковому режимі механічні напруження не перевищують допустимих значень, що вказує на правильність вибору вихідного кліматичного режиму.

2.5. ВИЗНАЧЕННЯ РЕЖИМУ НАЙБІЛЬШОЇ СТРИЛИ ПРОВИСАННЯ ПРОВОДУ

Критична температура за виразом (1.22) дорівнює

$$t_k := t_o + \frac{\sigma_{Omax}}{\alpha \cdot E} \left(1 - \frac{\gamma_1}{\gamma_3} \right) = 42 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Очевидно, критична температура перевищує максимальну

$$t_k > t_{max} \quad 42 \text{ } ^\circ\text{C} > 36 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Це означає, що найбільша стріла провисання проводу має місце в режимі максимальної ожеледі, що підтверджують результати розв'язання задачі 2.4.

2.6. РОЗРАХУНОК АВАРІЙНОГО РЕЖИМУ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ

Відповідно до умов задачі експлуатаційні характеристики проводу АС-240/39 становлять

- одиничне вагове навантаження $p_0 := p_1 = 9.336 \frac{H}{м}$
- напруження $\sigma_0 := \sigma_e = 74.45 \text{ МПа}$

Тяжіння проводу в доаварійному режимі становить

$$H_0 := \sigma_0 \cdot F = 20.449 \text{ кН}$$

Технічні параметри лінійного ізолятора ЛК 70/110-3

- будівельна висота $\lambda := 1280 \text{ мм}$
- маса $M_z := 3.65 \text{ кг}$

Розрахуємо спочатку редуковане тяжіння у першому прогоні анкерованої ділянки.

Для визначення початкового наближення редукованого тяжіння в аварійному режимі повітряної лінії виконаємо графоаналітичне розв'язання рівняння (4.6), в діапазоні тяжінь

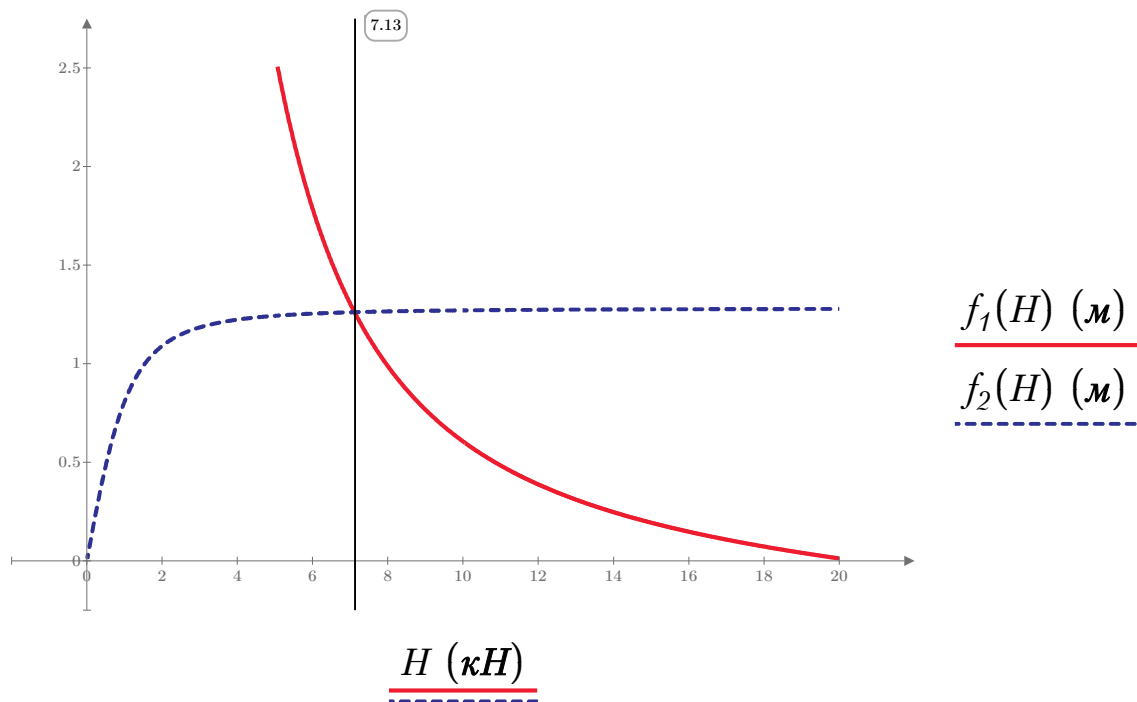
$$H := 0 \text{ кН}, 0.01 \text{ кН}..20 \text{ кН}$$

Визначимо функції залежності лівої та правої частин рівняння (1.25) від редукованого тяжіння

$$f_1(H) := \frac{l_1}{E \cdot F} (H_0 - H) - \frac{p_0^2 l_1^3}{24} \left(\frac{1}{H_0^2} - \frac{1}{H^2} \right)$$

$$f_2(H) := \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_0 \cdot l_1 + g \cdot M_z}{2 H} \right)^2}}$$

та сформуємо графіки цих функцій



Точка перетину кривих визначає шуканий розв'язок поставленої задачі. Наближене значення редукованого тяжіння становить 7,13 κH . Це значення будемо використовувати як початкове наближення в числовому розв'язанні рівняння (1.25).

Решатель

Оптимизация приближения

$$H := 7.13 \kappa H$$

$$\frac{l_1}{E \cdot F} (H_0 - H) - \frac{p_0^2 l_1^3}{24} \left(\frac{1}{H_0^2} - \frac{1}{H^2} \right) = \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_0 \cdot l_1 + g \cdot M_c}{2 H} \right)^2}}$$

$$H_1 := \text{find}(H) = 7.115 \kappa H$$

Коефіцієнт редукції та стріла провисання проводу в аварійному режимі в першому прогоні становлять

$$k_1 := \frac{H_1}{H_0} = 0.348$$

$$f_1 := \frac{p_0 \cdot l_1^2}{8 H_1} = 11.088 \text{ м}$$

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бошнякович А. Д. Механический расчёт проводов и тросов линий электропередачи / А. Д. Бошнякович. – Москва-Ленинград: Госэнергоиздат, 1962. – 254 с.
2. ГІД 34.20.501-2008 Розрахунок опор і проводів повітряних ліній електропередавання згідно з вимогами глави 2.4 ПУЕ: 2006 і глави 2.5 ПУЕ: 2006 Посібник
3. Глазунов А. А. Основы механической части воздушных линий электропередачи / А. А. Глазунов. – Москва-Ленинград: Госэнергоиздат, 1956. – 192 с.
4. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування / Мінбуд України – К., 2006 – 75 с.
5. Зеличенко А. С. Проектирование механической части воздушных линий сверхвысокого напряжения / А. С. Зеличенко, Б. И. Смирнов. – Москва: Энергоиздат, 1981. – 336 с.
6. Кацадзе Т. Л. Основы механічних розрахунків повітряних ліній електропередавання : Підручник / Т. Л. Кацадзе. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2019. – 336 с. – ISBN 978-966-622-953-6.
7. Кесельман Л. М. Основы механики воздушных линий электропередачи / Л. М. Кесельман. – Москва: Энергоатомиздат, 1992. – 352 с. – ISBN 5-283-01209-3.
8. Короткевич М. А. Проектирование линий электропередачи. Механическая часть /М. А. Короткевич. – Минск: Вышэйшая школа, 2010. – 574 с. – ISBN 978-985-06-1700-2.
9. Крюков К. П. Конструкции и механический расчет линий электропередачи / К. П. Крюков, Б. П. Новгородцев. – Ленинград: Энергия, 1979. – 312 с.
10. СОУ-Н ЕЕ 20.502:2007 Повітряні лінії електропередавання напругою 35 кВ і вище. Інструкція з експлуатації
11. СОУ-Н ЕЕ 20.579:2009 Кліматичні дані для визначення навантажень на повітряні лінії електропередавання. Методика опрацювання
12. СОУ-Н ЕЕ 20.667:2007 Кліматичні навантаження на повітряні лінії електропередавання з урахуванням топографічних особливостей. Методика
13. Сулейманов В.Н. Электричні мережі та системи: підручн. / В. М. Сулейманов, Т. Л. Кацадзе. Київ: НТУУ "КПІ", 2008. - 456 с. – ISBN 978-966-622-300-8

**ДОДАТОК А. БЛАНК ЗАВДАННЯ НА ВИКОНАННЯ
РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ
«МЕХАНІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ПРОВІДІВ
ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ»**

Студент _____

Група _____

1. Номінальна напруга повітряної лінії _____ кВ.
2. Марка проводу АС-_____.
3. Тип проміжної опори _____.
4. Тип підтримуючих ізоляторів _____.
5. Район траси повітряної лінії _____.
6. Прогони анкерованої ділянки _____ м
_____ м
_____ м
_____ м
_____ м
7. Аварійний прогін _____

Для заданого варіанту реалізувати механічний розрахунок проводів повітряної лінії в наступній послідовності.

1. Розрахувати середню висоту розташування центру мас проводів у прогоні та довжину зведеного прогону.
2. Розрахувати одиничні та питомі навантаження на проводи повітряної лінії.
3. Визначити вихідний кліматичний режим.
4. Реалізувати систематичний розрахунок проводів повітряної лінії на анкерованій ділянці.
5. Визначити кліматичний режим найбільшої стріли провисання проводу.
6. Розрахувати редуковане тяжіння та стрілу провисання проводу в суміжному з анкерною опорою прогоні в аварійному режимі, обумовленому обривом проводу в зазначеному прогоні.

Завдання видано _____ Термін здачі на перевірку _____

ДОДАТОК Б. ДОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ

Таблиця Д.1. Технічні дані сталевалюмінієвих проводів марок АС

Номіналь- ний переріз	Переріз, мм ²		Діаметр, мм		Маса про- воду без мастила кг/км
	алюміній	сталь	проводу	сталевого осереддя	
Зі співвідношенням А:С = 6,0					
16/2,7	16,0	2,69	5,6	1,9	64,9
25/4,2	24,9	4,15	6,9	2,3	100,3
35/6,2	36,9	6,15	8,4	2,8	148,0
50/8,0	48,2	8,04	9,6	3,2	195,0
70/11	68,0	11,3	11,4	3,8	276,0
95/16	95,4	15,9	13,5	4,5	385,0
Зі співвідношенням А:С = 6,11÷6,28					
120/19	118,0	18,8	15,2	5,6	471,0
150/24	149,0	24,2	17,1	6,3	599,0
185/29	181,0	29,0	18,8	6,9	728,0
240/39	236,0	38,6	21,6	7,2	952,0
300/48	295,0	47,8	24,1	8,9	1186,0
400/64	390,0	63,5	27,7	10,2	1572,0
Зі співвідношенням А:С = 4,29÷4,39					
120/27	114,0	26,6	15,4	6,6	528,0
150/34	147,0	34,3	17,5	7,5	675,0
185/43	185,0	43,1	19,6	8,4	846,0
240/56	241,0	56,3	22,4	9,6	1106,0
300/66	288,5	65,8	24,5	10,5	1313,0
400/93	406,0	93,2	29,1	12,5	1851,0
Зі співвідношенням А:С = 7,71÷8,04					
150/19	148,0	18,8	16,8	5,6	554,0
185/24	187,0	24,2	18,9	6,3	705,0
240/32	244,0	31,7	21,6	7,2	921,0
300/39	301,0	38,6	24,0	8,0	1132,0
330/43	332,0	43,1	25,2	8,4	1255,0
400/51	394,0	51,1	27,5	9,2	1490,0
500/64	490,0	63,5	30,6	10,2	1852,0
600/72	580,0	72,2	33,2	11,0	2170,0
Зі співвідношенням А:С = 1,46					
185/128	187,0	128,0	23,1	14,7	1525,0
300/204	298,0	204,0	29,2	18,6	2428,0
500/336	490,0	336,0	37,5	23,9	4005,0
Зі співвідношенням А:С = 0,65					
70/72	68,4	72,2	15,4	11,0	755,0
Зі співвідношенням А:С = 0,95					
95/141	91,2	141,0	19,8	15,4	1357,0

Таблиця Д.2. Фізико-механічні характеристики проводів і тросів

Проводи і троси	Модуль пружності <i>ГПа</i>	Температурний коефіцієнт лінійного здовження $10^{-6} \text{ град}^{-1}$	Межа міцності під час розтягування <i>МПа</i>
Алюмінієві	63	23,0	160
З нетермообробленого алюмінієвого сплаву	63	23,0	208
З термообробленого алюмінієвого сплаву	63	23,0	285
Сталеалюмінієві з відношенням площ поперечного перерізу А:С			
20,27	70,4	21,5	210
16,87–17,82	70,4	21,2	220
11,51	74,5	21,0	240
7,71–8,04	77,0	19,8	270
6,0–6,28	82,5	19,2	290
4,29–4,39	89,0	18,3	340
2,34	103	16,8	460
1,46	114	15,5	565
0,95	134	14,5	690
0,65	134	14,5	780
З термообробленого алюмінієвого сплаву зі сталевим осереддям з відношенням площ поперечного перерізу А:С			
1,71	116,5	15,83	620
1,46	120	15,5	650
Сталеві проводи	200	12,0	620
Сталеві троси	185	12,0	1200
Захищені проводи	62,5	23,0	294
Компактні проводи марок Aero-Z, AFLs, HVCRC	за технічними умовами виробника		

Таблиця Д.3. Допустимі механічні напруження в проводах і тросах

Проводи і троси	Допустиме механічне напруження $\sigma_{\text{доп}}$, МПа	
	за найбільшого навантаження та мінімальної температури	за середньорічної температури
Алюмінієві перетином, мм ² :		
70–95	56	48
120–240	64	51
300–750	72	51
З нетермообробленого алюмінієвого сплаву перетином, мм ² :		
50–95	83	62
120–185	94	62
З термообробленого алюмінієвого сплаву перетином, мм ² :		
50–95	114	85
120–185	128	85
Сталеалюмінієві перетином алюмінієвої частини проводу, мм ² :		
35–95 при А:С від 5,99 до 6,02	120	90
70 при А:С 0,95	272	204
95 при А:С 0,65	308	231
120 і більше при А:С від 4,29 до 4,38	153	102
150–800 при А:С від 7,8 до 8,04	126	84
185 і більше при А:С від 6,14 до 6,28	135	90
185, 300 і 500 при А:С 1,46	254	169
330 при А:С 11,51	117	78
400 і 500 при А:С 20,27 і 18,87	104	69
400, 500 і 1000 при А:С 17,91; 18,08 і 17,85	96	64
500 при А:С 2,43	205	137
З термообробленого алюмінієвого сплаву зі сталевим осереддям перетином алюмінієвої частини, мм ² :		
70 при А:С 1,71	279	186
500 при А:С 1,46	292	195
Сталеві проводи	310	216
Сталеві линви	згідно стандартів та технічних умов	
Захищені проводи	114	85
Компактні проводи марок Aero-Z, AFLs, HVCRC	за технічними умовами виробника	

Таблиця Д.4. Найменші відстані від проводів повітряної лінії до поверхні землі, будівель та споруд

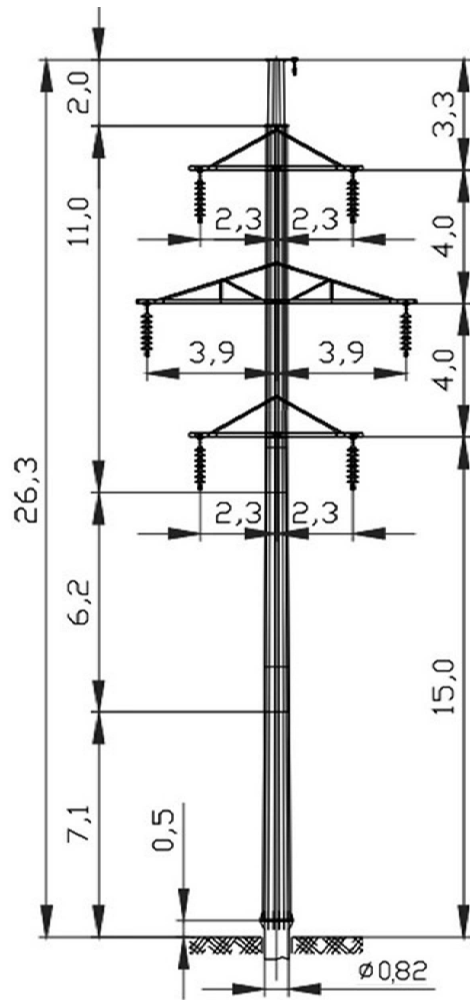
Характеристика місцевості	Напруга лінії, кВ						
	до 35	110	150	220	330	500	750
Нормальний режим							
Населена: – до поверхні землі	7	7	7,5	8	8	8	12
– до будівель та споруд	3	4	4	5	6	8	12
Ненаселена	6	6	6,5	7	7,5	8	12
Важкодоступна	5	5	5,5	6	6,5	7	10
Недоступні гірські схили, скелі тощо	3	3	3,5	4	4,5	5	7,5
Аварійний режим							
Населена: – до поверхні землі	5,5	5,5	5,5	5,5	–	–	–

Таблиця Д.5. Характеристики полімерних лінійних ізоляторів

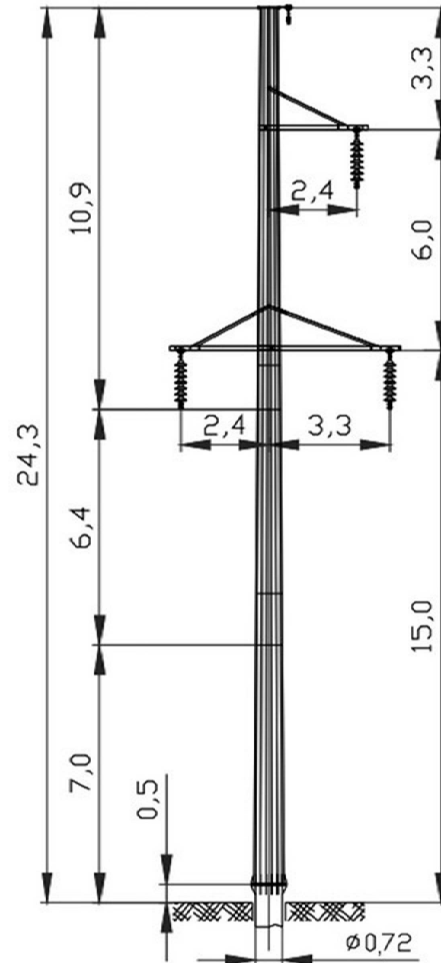
Тип ізоляторів	Номінальна напруга лінії, кВ	Механічне руйнівне навантаження, кН	Геометричні розміри, мм				Вага, кг	Витримувана напруга, кВ	
			Будівельна висота	Ізоляційна висота	Діаметр ребра	Довжина шляху витоку		Грозового імпульсу	Комутаційного імпульсу
ЛК 70/35-3	35	70	592	358	90	900	1,8	230	–
ЛК70/110-3	110	70	1248	1008	90	2640	3,65	570	480
ЛК70/220-3	220	70	2098	1858	90	4800	5,6	1050	820
ЛК70/330-3	330	70	2880	2640	90	6700	7,7	1370	1160
ЛК160/220-3	220	160	2125	1835	110	4680	9,1	1000	850
ЛК160/330-3	330	160	2973	2693	110	7200	12,4	1400	1150
ЛК160/500-3	500	160	3894	3551	110	9500	16,0	1740	1450
ЛК300/330-3	330	300	2998	2586	130	6850	17,5	1350	1100
ЛК300/500-3	500	300	3844	3432	130	9130	21,8	1730	1300
ЛК300/500-А3	500	300	3995	3585	130/ 95	11100	22,8	1800	1500
ЛК600/330-3	330	600	3140	2660	150/ 120	7200	31,2	1440	1030

Таблиця Д.6. Схеми проміжних багатограних металевих опор

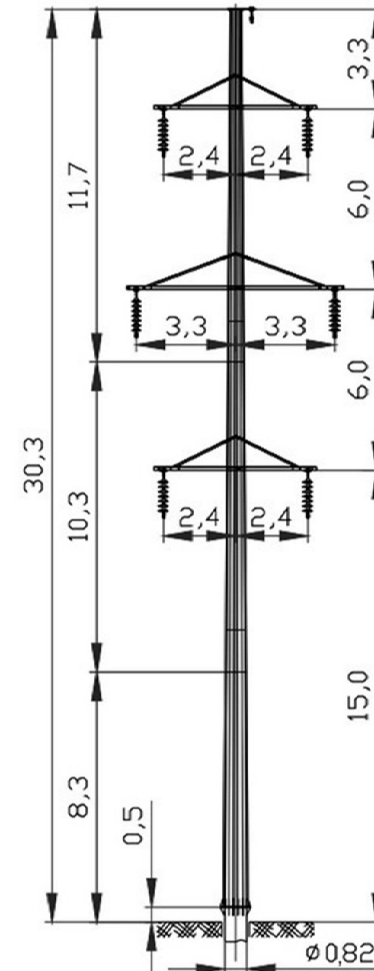
	ПМ-110-3Ф
	ПМ-110-2Ф
	ПМ-110-1Ф



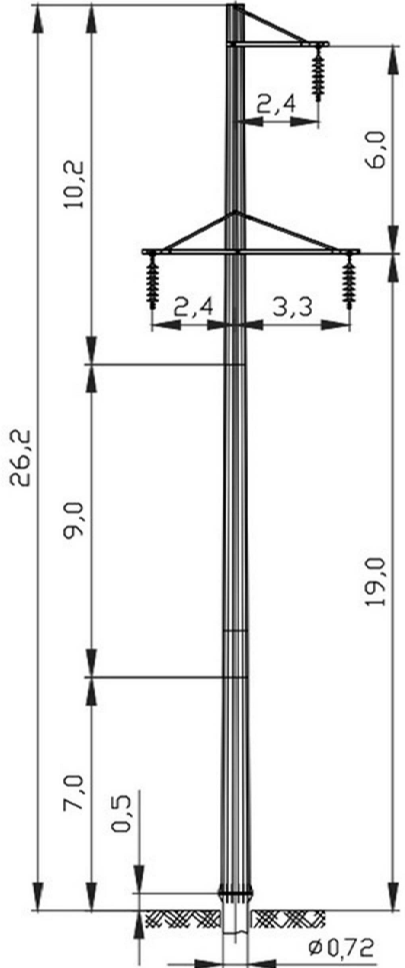
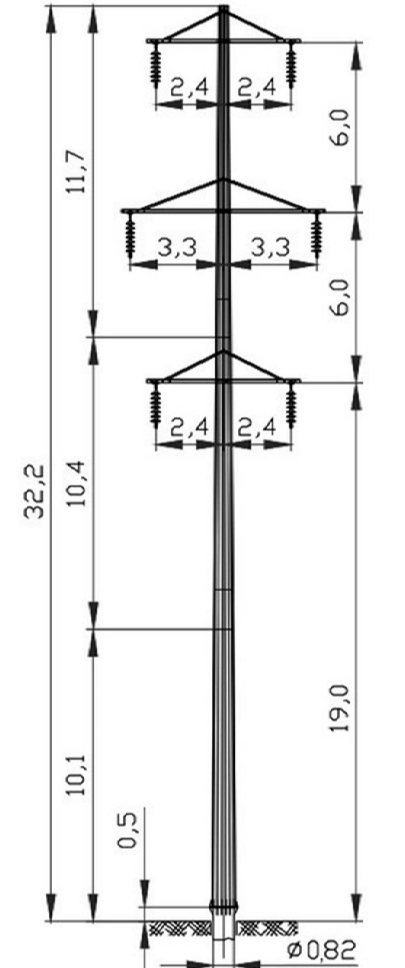
ПМ-110-4Φ



ПМ-110-5Φ



ПМ-110-6Φ

	ПМ-110-7ФР
	ПМ-110-8ФР

ДОДАТОК В. КЛІМАТИЧНЕ РАЙОНУВАННЯ
ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ

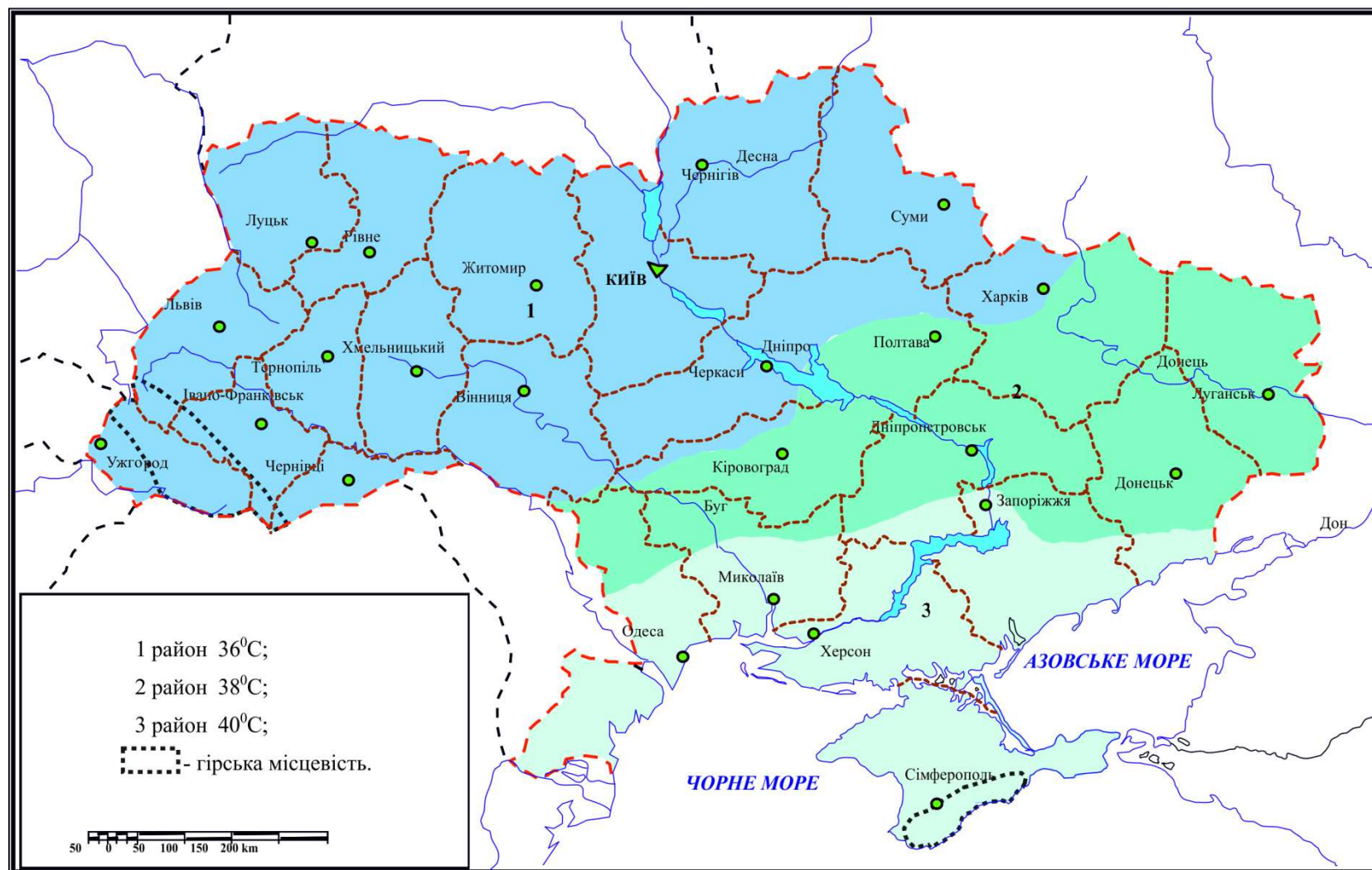


Рис. Д.1. Районування території України за максимальною температурою повітря

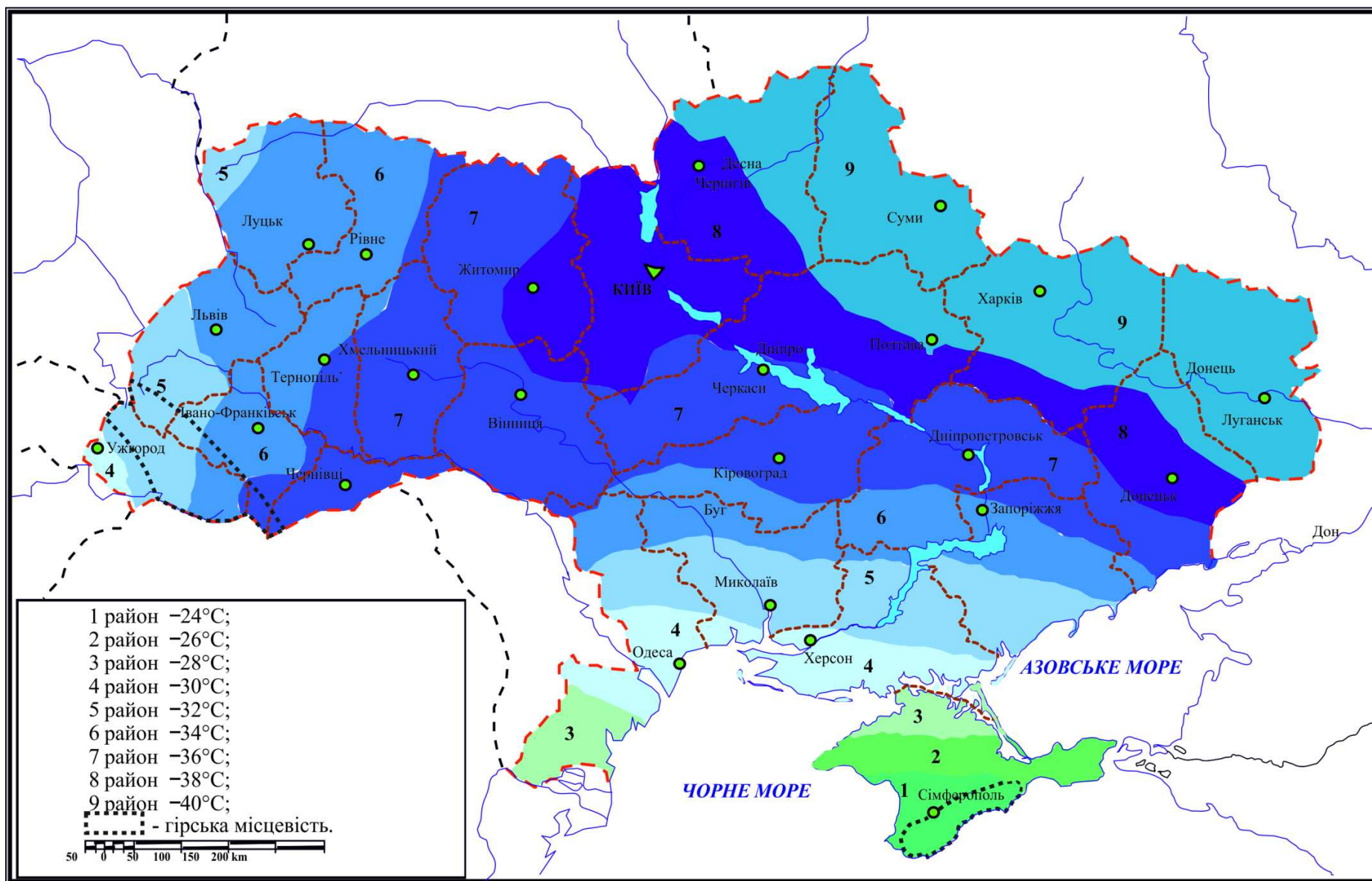


Рис. Д.2. Районування території України за мінімальною температурою повітря

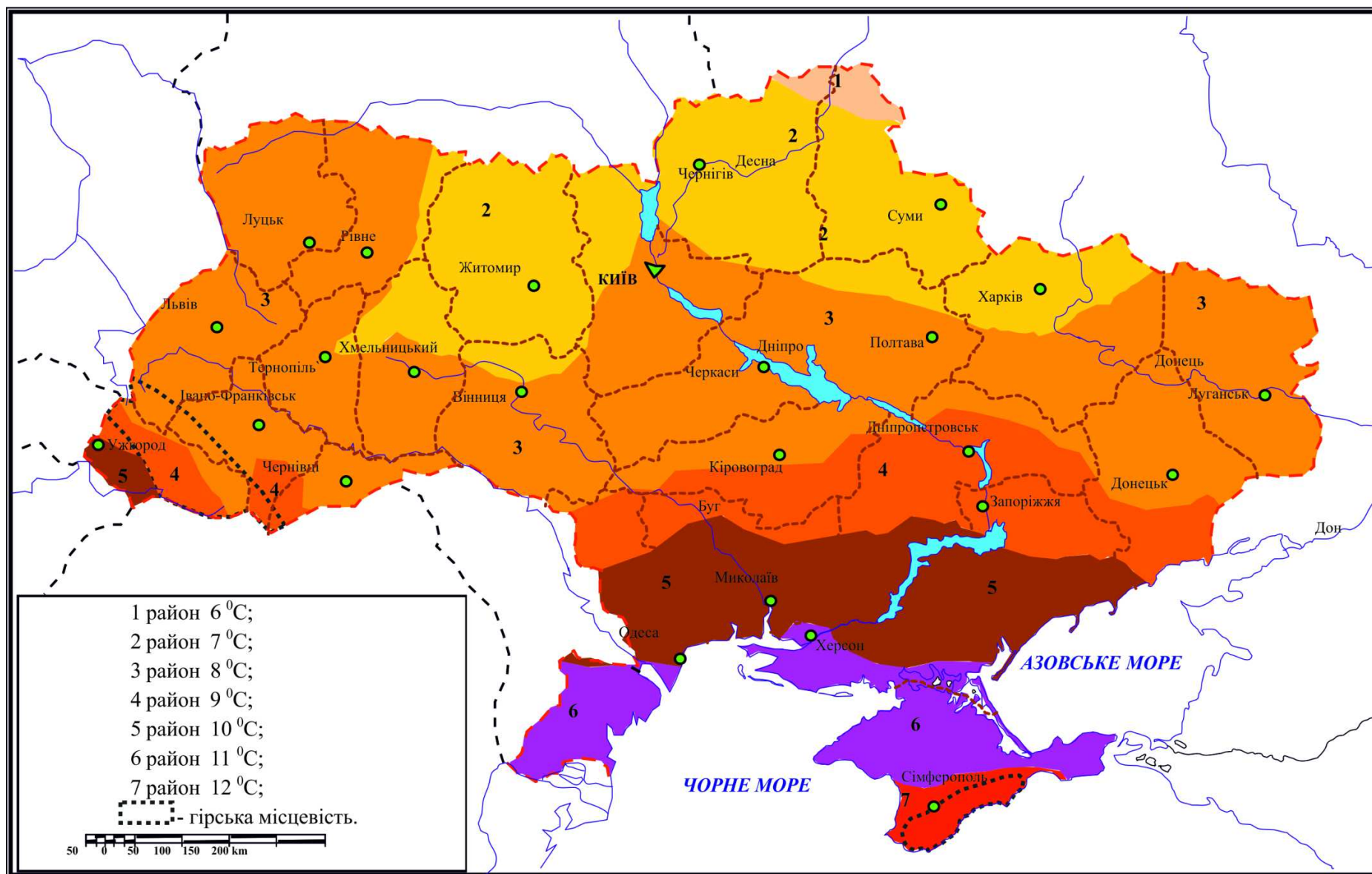


Рис. Д.3. Районування території України за середньорічною температурою повітря

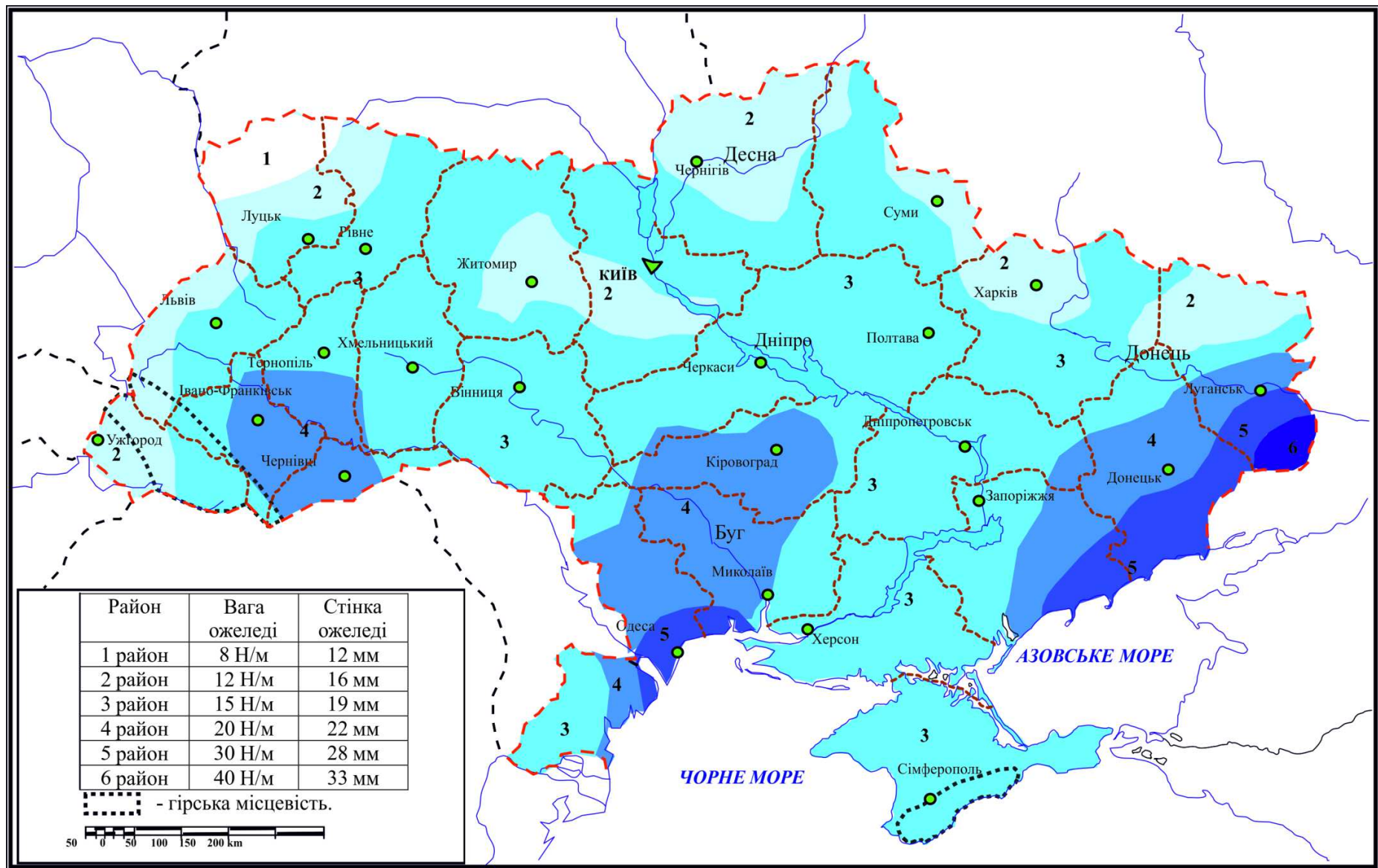


Рис. Д.4. Районування території України за характеристичними значеннями ожеледі

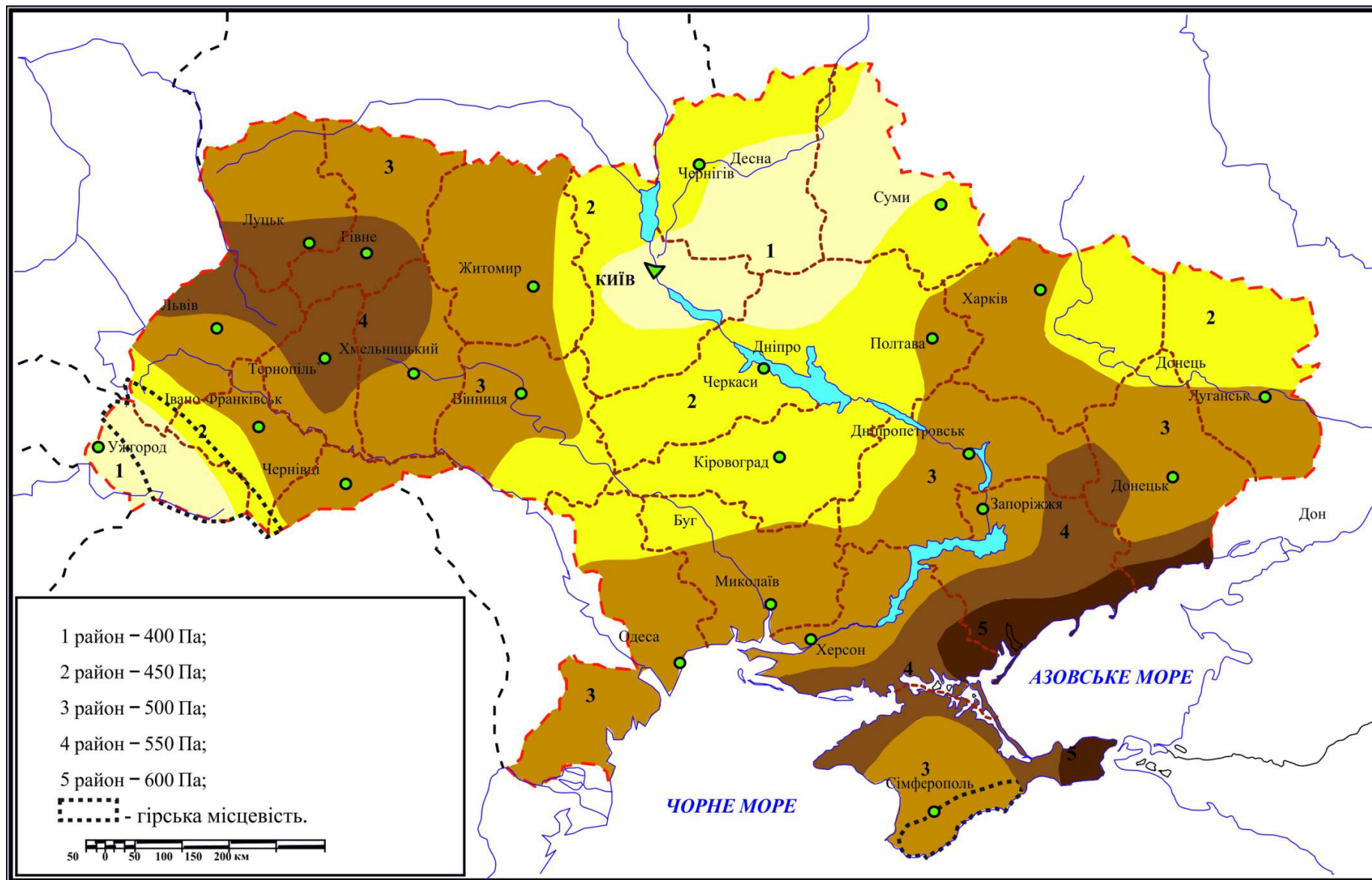


Рис. Д.5. Районування території України за характеристичними значеннями натиску вітру

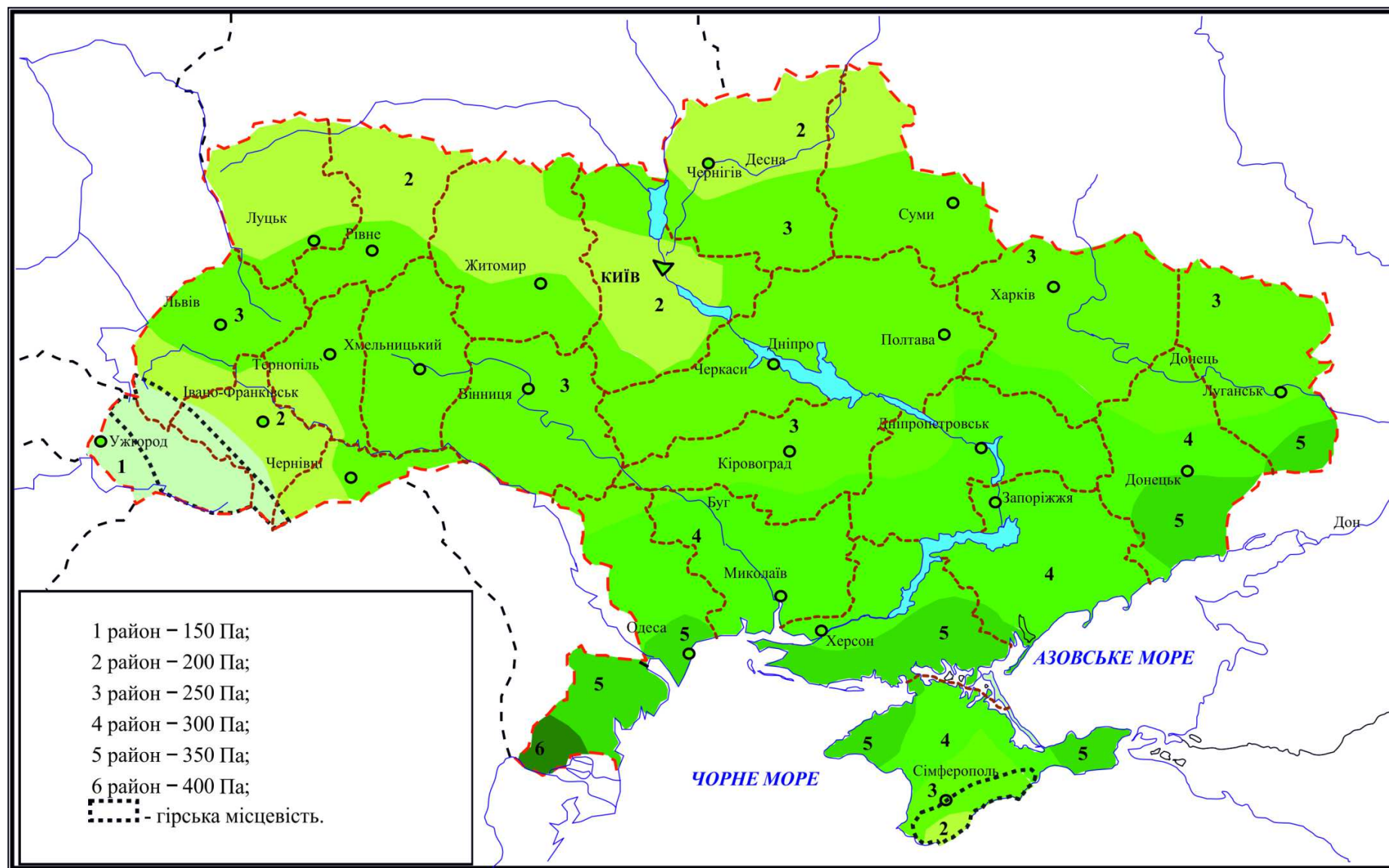


Рис. Д.6. Районування території України за характеристичними значеннями натиску вітру під час ожеледі